

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MINERA, GEOLÓGICA Y
CARTOGRÁFICA**

**RELACIONES HIDROGEOLÓGICAS Y MEDIOAMBIENTALES
ENTRE EL MAR MEDITERRÁNEO, EL SALADAR Y EL
ACUÍFERO DE AGUA AMARGA (PROVINCIA DE ALICANTE).
INCIDENCIA DE LAS EXPLOTACIONES DE LAS DESALADORAS
DE ALICANTE I Y II Y MEDIDAS CORRECTORAS**

Autor: Iván Alhama Manteca

Directores: Tomás Rodríguez Estrella y Francisco Alhama López

*A mis abuelos Francisco y Aurora, Maruja y Benito,
y a mi tía Toni*

No busquemos en nuestras investigaciones ni la gloria ni el boato pues, por alto que nos valoremos, no pasamos de ser simples peones que aportamos una piedra más al edificio... de la Geología.

Cuando exponamos nuestras teorías, hagámoslo con honradez y humildad, respetando siempre cualquier opinión diferente a la nuestra, pues la "verdadera Verdad" es casi siempre el punto de convergencia de muchos caminos, a veces, distantes y antagónicos.

Si nuestros oídos saben y quieren escuchar callados la boca ajena, tal mutismo no será estático ni estéril; será entonces cuando caminaremos realmente por la senda del progreso de la Ciencia y del entendimiento entre los hombres.

Tomás Rodríguez Estrella, 1979

Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido posible merced a la intervención de dos personas: En primer lugar, el profesor Tomás Rodríguez Estrella por darme la oportunidad de doctorarme en hidrogeología, integrarme en su equipo de trabajo y hacerme partícipe de sus proyectos; también, por los conocimientos que me ha aportado durante las discusiones científicas, por su asesoramiento continuo y por su formalidad y trato. En segundo lugar, a mi padre por su participación en el trabajo y su incondicional apoyo diario.

Agradezco especialmente al profesor Emilio Trigueros Tornero su apoyo y su invitación a participar en proyectos de investigación; gracias a su generosidad he podido financiar en buena parte este trabajo.

A Elena Giménez y Ángela Vallejos, por su asesoramiento técnico en Hidroquímica; a Cristóbal García, por su colaboración en las campañas de campo y a Andrés García, por su ayuda en la confección de figuras. A los profesores Antonio Soto, Pepe Álvarez, Pedro Martínez, Manolo Alcaraz y Marcos Martínez, por las muestras de apoyo y ánimo.

A los directivos de la Mancomunidad de los Canales del Taibilla, en particular a Andrés Martínez, Carlos Conradi y Juan Montero, por permitir que los datos básicos fueran incorporados a la memoria; y al personal técnico de las Desaladoras de Alicante I y II, concretamente a Gonzalo Cruz y Juan Carlos González, por facilitarme con prontitud cuantos datos técnicos les solicité.

Finalmente a mis amigos y a mi familia por su aliento: Encarna, Javi y Paqui (mi madre).

RESUMEN

El Saladar de Agua Amarga, situado al sur de Alicante, se encuentra sobre un acuífero costero del mismo nombre que en las últimas décadas ha sido escenario de dos intervenciones antrópicas sucesivas: la actividad de una industria salinera y la explotación para el abastecimiento de las desaladoras de Alicante I y II. Estas intervenciones han condicionado sensiblemente tanto la calidad química de las aguas subterráneas, cuya elevada salinidad es consecuencia de las antiguas salinas, como el régimen de flujo, merced a los conos de bombeo de los pozos de extracción de las desaladoras. Además, el saladar está ligado a una zona húmeda de interés ecológico. Con objeto de realizar un seguimiento piezométrico y de calidad química de las aguas del acuífero, la Mancomunidad de los Canales del Taibilla (organismo gestor de la explotación de las desaladoras), en colaboración con la UPCT, diseñó una red de control sobre el saladar y su entorno. Desde mayo de 2008, se realiza un registro mensual de piezometría y conductividad eléctrica, proporcionando los datos tratados en el presente trabajo.

En esta Tesis Doctoral se investiga el régimen hidrodinámico e hidroquímico del acuífero y se desarrolla un modelo conceptual de funcionamiento. En primer lugar se caracteriza el entorno de la zona de estudio en relación con su climatología, geología, geomorfología e hidrogeología, utilizando la información bibliográfica existente, y se describen las obras de captación de las desaladoras. A continuación, a partir de los informes de la etapa de investigación previa a la construcción de las desaladoras y de la información geológica de nuevas campañas de campo, se caracteriza el acuífero costero de Agua Amarga: tipo de acuífero, litología, parámetros hidráulicos, espesor, extensión, etc. Para valorar las respuestas del acuífero frente a los registros de lluvias, extracciones y vertidos de agua del mar sobre el saladar, se ha integrado esta información con los datos de las campañas mensuales de control de piezometría y calidad química. Paralelamente, con el objeto de conocer los procesos de mezcla y el origen de las aguas, se han efectuado análisis químicos e isotópicos a muestras de aguas meteóricas y subterráneas en distintos puntos. Con todo ello se ha elaborado un modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y un balance hídrico. Como apoyo a este estudio se realiza un modelo 3-D de flujo y transporte con SEAWAT con la pretensión de explicar e interpretar cualitativa, y en menor medida cuantitativamente, los procesos que tienen lugar en el acuífero, ya sean motivados por intervenciones antrópicas o naturales. También se incluye un estudio de la caracterización física de escenarios 2-D de intrusión marina en presencia de saladares cercanos.

Por último, se describen los valores ecológicos del humedal y se evalúa el efecto de la actividad de las desaladoras y del plan de recuperación con vertidos de agua de mar sobre la piezometría y salinidad de las aguas, valorando la posibilidad de implementar estas medidas en otros escenarios semejantes.

ABSTRACT

The Saladar of Agua Amarga, located at the south of Alicante province, lays over the coastal aquifer of its name which in the last decades has been subjected to two successive anthropogenic actuations: the exploitation of a salt marsh at its surface and the water supply for the desalination plants of Alicante I and II. These actuations have mostly influenced both by the chemical quality of the underground water, whose high grade of salinity is a direct consequence of the ancient salt marsh, and the flow regime, due to the pumping cone of the extraction wells of plants. In addition, the Saladar of Agua Amarga is linked to a wetland zone of ecological interest. In order to realize the study of the piezometric changes as well as the chemical quality of the ground water caused by the anthropogenic actuations, the 'Mancomunidad de los Canales del Taibilla' (responsible of the exploitation of the plants), in collaboration with the UPCT, designed a piezometric network over the Saladar and its surroundings. From May 2008, is carried out a monthly lecture of piezometry and electric conductivity to provide the treated in this work.

In this Doctoral Thesis it is investigated the hydro-dynamic and hydro-chemical regimes of the Agua Amarga's aquifer developing a performance conceptual model. Firstly, the study area is characterized in relation to its climatology, geology, geomorphology and hydrogeology, by using the background (bibliography) information; the facilities of the desalination plants are also described. Next, from the studies of both the researching made before the installation of the plants and the geological data coming from the new field campaigns, the coastal Agua Amarga aquifer is characterized: sort of aquifer, lithology, hydraulic parameters, thickness, surface extension, etc. To assess the behavior of the aquifer as regards of rainfalls, water catchments for the plants and seawater pouring over the saladar, this information has been integrated in conjunction to the data coming from the monthly campaigns of the control of piezometry and water quality. In parallel, in order to know the mixing processes and the origin of the water, chemical and isotope analysis were carried out on samples of both meteoric and underground water taken at different locations. All the results were used to elaborate a conceptual performance model of the aquifer and a water balance. As an added support of this study a 3-D fluid-flow and solute-transport model has been designed and run in SEAWAT in order to provide a qualitative, and in less degree quantitative, explanation for the processes that emerges in the aquifer, either due to the anthropogenic or natural actuations. Also, the physical characterization of 2-D, marine intrusion with salt flats, scenarios are presented.

Finally, ecological values of the wetland are described, evaluating the effect of the salt marsh and the plan of wetland restoration (based on a program of seawater pouring) in the piezometry and salinity of the water, studying the possibility of applied the program to other scenarios.

ÍNDICE

1. Introducción.	1
1.1. Motivación y justificación	2
1.2. Antecedentes.	3
1.3. Localización y descripción de la zona de estudio	4
1.4. Objetivos.	5
1.5. Metodología	6
1.6. Perspectivas.	7
2. Climatología	9
2.1. Generalidades.	10
2.2. Estación pluviométrica de ‘El Altet’. Datos de partida	11
2.3. Distribución de precipitación es y temperatura.	12
2.4. Evapotranspiración potencial	14
3. Geología.	15
3.1. Antecedentes bibliográficos	16
3.2. Encuadre geológico-regional.	17
3.3. Características geológicas generales del Campo de Elche	21
3.4. Características geológicas de la zona de estudio: Saladar de Agua Amarga y alrededores.	23
3.4.1. Estratigrafía	24
3.4.1.1. Tortoniense superior.	24
3.4.1.2. Messiniense (Andaluciense)	24
3.4.1.3. Plioceno.	25
3.4.1.4. Plio-cuaternario	26
3.4.1.5. Pleistoceno (Tirreniense)	26
3.4.1.6. Holoceno	29
3.4.2. Tectónica y neotectónica.	29
4. Geomorfología	33
4.1. Relieve.	34
4.2. Hidrología	35
4.3. Formas kársticas.	36
4.3.1. Neokarst en los caliches de la Formación Sucina	36
4.3.2. Neokarst en las calcarenitas oolíticas del Tirreniense.	41
4.4. Formas eólicas	42
5. Desaladora de Alicante I (DA-I)	43
5.1. Obras de captación: sondeos verticales	44
5.2. Régimen de explotación.	47
5.3. Análisis sobre el rendimiento de los pozos	49
6. Desaladora Alicante II (DA-II)	51
6.1. Obras de captación	52
6.1.1. Características constructivas de las bocas de entrada y de salida.	53
6.1.2. Sondeos inclinados en las bocas de entrada y salida al túnel.	53
6.1.3. Características constructivas del túnel.	54
6.1.4. Pozos inclinados en el interior del túnel	55
6.1.5. Perforaciones horizontales dirigidas.	56
6.2. Régimen de explotación	59
7. Hidrogeología: acuífero costero de Agua Amarga.	63
7.1. Antecedentes bibliográficos	64
7.2. Contexto hidrogeológico regional: características del acuífero del Campo de Elche.	64
7.3. Rocas permeables e impermeables: parámetros hidráulicos	71
7.4. Límites del acuífero.	73
7.5. Piezometría	75

7.5.1. Antecedentes.	75
7.5.2. Red de control	78
7.5.3. Evolución de la piezometría.	81
7.5.3.1 Evolución de la piezometría en el saladar y su entorno	81
7.5.3.2 Evolución de la piezometría en las captaciones de la DA-I.	84
7.5.3.3 Evolución de la piezometría en la línea de costa	85
7.5.3.4 Evolución de la piezometría en los pozos alejados del saladar.	88
7.5.4. Mapas de isopiezas	88
7.5.5. Mapas de isovariaciones piezométricas.	93
7.6. Calidad química del agua	95
7.6.1. Aspectos teóricos.	95
7.6.2. Variación de la conductividad	97
7.6.2.1. Registros DA-I.	97
i) Registros previos a la puesta en marcha: años 2000 a 2002	97
ii) Registros en los pozos de abastecimiento: años 2003 a 2010.	98
iii) Registros en el agua de la cántara de almacenamiento: años 2004-201	100
7.6.2.2. Registros DA-II.	101
iv) Registros previos a la puesta en marcha: años 2003 y 2004	101
v) Registros en el agua de la cántara de almacenamiento, años 2009 y 2010.	103
7.6.2.3. Registros en la zona del saladar y alrededores, años 2008 a 2010	104
vi) Registros en la zona oeste del saladar.	104
vii) Registros en el saladar	105
viii) Registros en la línea de costa.	107
ix) Registros en piezómetros junto a la DA-I	109
x) Registros en pozos alejados del saladar.	111
7.6.2.4. Mapas de isoconductividades en profundidad	111
7.6.3. Análisis químicos.	115
7.6.3.1. Análisis de las muestras obtenidas durante los ensayos de bombeo realizados en la etapa de investigación previa al funcionamiento de las desaladoras.	116
7.6.3.2. Análisis hidroquímicos de aguas superficiales, lluvia, mar, piezómetros y captaciones con las desaladoras en marcha.	118
i) Balance de cationes y aniones	118
ii) Clasificación de las aguas.	119
iii) Relaciones iónicas y nitratos. Discusión de resultados	119
7.6.4. Origen de la salinidad en el área de estudio	126
7.6.5. Isótopos estables del agua	131
7.6.5.1. Generalidades.	131
7.6.5.2. Contenido isotópico de las aguas estudiadas	132
7.6.6. Variación de la temperatura.	136
7.6.6.1. Registros DA-I	136
i) Registro en los pozos de abastecimiento, julio de 2009.	136
ii) Registros en el agua de la cántara de almacenamiento: años 2004-2010	136
7.6.6.2. Registros en la zona del saladar y alrededores: años 2008 a 2010.	136
iii) Registros en el saladar y alrededores del mismo	137
iv) Registros en la línea de costa.	138
v) Registros junto a las explotaciones de la DA-I	139
7.7. Balance hídrico.	139
7.7.1. Modelo conceptual	139
7.7.2. Entradas al sistema acuífero.	141
7.7.2.1. Recarga por infiltración de lluvia útil	141
7.7.2.2. Aportación lateral subterránea desde acuíferos continentales.	144
7.7.2.3. Vertidos de agua de mar al saladar	144
7.7.2.4. Entradas desde el mar.	145
7.7.3. Salidas del sistema acuífero.	146
7.7.3.1. Extracciones desde las desaladoras DA-I y DA-II	146

7.7.3.2. Salidas al mar.	147
7.7.4. Balance hídrico resultante	147
8. Caracterización de escenarios de intrusión con saladares cercanos mediante FATSIM-A y simulación numérica del escenario del Saladar de Agua Amarga con SEAWAT.	151
8.1. Introducción	152
8.2. Caracterización de escenarios 2-D de intrusión marina con saladares cercanos	153
8.2.1. Flujo de densidad variable con transporte de soluto	153
8.2.1.1. Propiedades del agua.	154
8.2.1.2. Ecuaciones de gobierno	156
8.2.1.3. Expresiones generales.	159
8.2.1.4. Formulación con la altura piezométrica	162
8.2.1.5. Formulación con la función de corriente.	163
8.2.2. Formulación adimensional clásica	165
8.2.3. Formulación adimensional discriminada	166
8.2.4. Grupos adimensionales asociados con la explotación salinera	169
8.2.5. Justificación de los resultados.	169
8.2.6. El programa FATSIM-A (© upct)	171
8.2.6.1. Estructura del programa.	171
8.2.6.2. Creación de archivos de modelos	173
8.2.6.3. Criterios para la numeración de celdas, nodos y elementos del modelo y estructura del archivo del modelo.	176
8.2.6.4. Pantallas de presentación de resultados	178
8.3. Creación del modelo básico de SEAWAT.	180
8.3.1. Geometría, mallado y parámetros hidrogeológicos	180
8.3.2. Condiciones de contorno.	183
8.3.3. Escenario 1: cuña de intrusión previa a la intervención antrópica	185
8.3.4. Escenario 2: explotación salinera.	188
8.3.5. Escenario 3: periodo entre fin de la explotación salinera y arranque de la DA-I	191
8.3.6. Escenario 4: extracciones de las desaladoras.	194
8.3.7. Escenario 5: vertidos y estado actual	200
8.3.8. Escenario 6: vertidos sin la influencia del saladar.	204
8.3.9 Calibración del modelo y comentarios finales	207
9. Incidencia de las explotaciones de las desaladoras DA-I y DA-II en el humedal del Saladar de Agua Amarga y medidas correctoras.	211
9.1. Introducción. El humedal del Saladar de Agua Amarga	212
9.2. Características biológicas del Saladar de Agua Amarga.	214
9.3. Afecciones medioambientales potenciales y propuesta de restauración del humedal	218
9.4. Modificaciones en la profundidad del agua con la restauración.	224
9.5. Modificaciones de la salinidad del acuífero	226
10. Conclusiones.	229
10.1. De carácter general	230
10.2. De carácter específico.	231
10.2.1. En relación con la piezometría	231
10.2.2. En relación con la hidroquímica.	231
10.2.3. En relación con la intrusión marina	233
10.2.4. En relación con el balance.	233
10.2.5. En relación con la recuperación del humedal	234
10.2.6. En relación con la modelización.	234
Referencias	237
Anexos	
1. Columnas estratigráficas	247
2. Coordenadas de pozos, sondeos y piezómetros	251
3. Evoluciones piezométricas	255
4. Variaciones de la piezometría con la profundidad asociadas a cambios de concentración (deducidos a partir de medidas de conductividad eléctrica) y errores relativos.	265

5. Análisis químicos en pozos de la DA-I durante la fase de investigación previa a la puesta en marcha de la desaladora.	269
6. Registros mensuales de evolución de la conductividad eléctrica en profundidad	273
7. Análisis químicos.	279
8. Gráficas de evolución temporal y en profundidad de la temperatura	285
9. Cálculo de la ETP	291
10. Cálculo de la infiltración mensual	293

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localización geográfica general de la zona de estudio.	4
Figura 1.2. Localización geográfica detallada de la zona de estudio	5
Figura 2.1. Precipitación media anual en mm para el periodo 1970-2000.	10
Figura 2.2. Temperatura media anual, en °C, para el periodo 1970-200	11
Figura 2.3. Valores medios estacionales de precipitación y temperatura para el periodo 1967-2003.	12
Figura 2.4. Precipitaciones máximas en 24 horas para el periodo 1967-2003	12
Figura 2.5. Precipitaciones anuales para el periodo 1979-2010.	13
Figura 2.6. Precipitaciones mensuales para el periodo hidrológico 2007-2010	13
Figura 2.7. Valores medios mensuales de precipitación, temperatura y ETP (Thornwaite) para el periodo 1967-200.	14
Figura 3.1. Situación de la cuenca del Bajo Segura (BS) dentro del contexto de las Cordilleras Béticas. Síntesis de las secuencias sedimentarias. I: Secuencias Transgresivas; II: Depósitos Progradantes; III: Secuencia Regresiva; IV: Secuencias Transgresivas y Depósitos Progradantes; V: Transgresión seguida de Regresión y VII: Depósitos continentales (Vera, 2004).	18
Figura 3.2. Esquema geológico regional del Sureste Español (Rodríguez Estrella, 1979)	19
Figura 3.3. Correlación de las series de: Sierra del Colmenar (C-1), El Saladar (C-4), Cala Calabarda (C-2) y Playa del Saladar (C-3).	20
Figura 3.4. Corte geológico del entorno de la zona de estudio, con el Subbético en la base de los sedimentos post-manto. Modificado de IGME-DPA (1994)	21
Figura 3.5. Accidentes tectónicos en el Campo de Elche (Rodríguez Estrella et al., 1992)	22
Figura 3.6. Mapa geológico de la zona de estudio y corte geológico I-I', realizados a partir de la información recogida en la campaña de campo e integrando la información de sondeos).	23
Figura 3.7. Corte geológico oeste-este, perpendicular a la línea de costa a la altura del Saladar	27
Figura 3.8. Corte geológico N-S de la zona de estudio paralelo a la costa. Se ha integrado la información de 12 sondeos geotécnicos y más de 30 sondeos a rotoperCUSión	28
Figura 3.9. Corte geológico paralelo a la costa (Rodríguez Estrella et al., 2008)	29
Figura 4.1. Mapa topográfico de la zona de estudio.	34
Figura 4.2. Campo de dolinas entre El Altet y Balsares	38
Figura 5.1. Situación de los pozos de la DA-I.	46
Figura 5.2. Volúmenes de extracción anual de la DA-I y precipitaciones durante el periodo 2004-2009	47
Figura 5.3. Volúmenes de extracción mensual de la DA-I y precipitaciones durante el periodo septiembre de 2008 a diciembre de 2010.	48
Figura 5.4. Relación de volúmenes de extracción anuales de los pozos de captación de la DA-I, para el periodo 2004 a 2009.	49
Figura 5.5. Relación entre los caudales extraídos, capacidad de la bomba instalada y profundidad del nivel dinámico de los pozos de captación de agua subterránea de la DA-I. Valores promedio durante el primer semestre de 2009.	49
Figura 5.6. Caudales específicos promedio calculados para el primer semestre de 2009. Se ha representado la profundidad del tramo sellado (eje derecho)	50
Figura 6.1. Sección esquemática sur (izquierda)-norte (derecha) de las obras de captación de la DA-II (no se muestran los PHD)	53
Figura 6.2. Volúmenes mensuales de agua de mar extraídos para la DA-II y precipitaciones mensuales durante el periodo septiembre de 2008/diciembre de 2010.	60
Figura 7.1. Masas de Agua Subterránea en la Cuenca del Júcar	65
Figura 7.2. Sistemas de Explotación y Unidades Hidrogeológicas	66
Figura 7.3. Mapa hidrogeológico del Campo de Elche (modificado de IGME, 1985)	68
Figura 7.4. Neokarst cuaternario en el Altet (Rodríguez Estrella et al., 1992)	69
Figura 7.5. Isopiezas del acuífero del Campo de Elche correspondientes a Febrero de 1986 (Rodríguez Estrella et al., 1992)	69

Figura 7.6. Esquema hidrogeológico de la Laguna de Bras del Port (Rodríguez Estrella et al., 1992)	70
Figura 7.7. Esquema hidrogeológico de la Laguna de Balsareta (Rodríguez Estrella et al., 1992)	71
Figura 7.8. Mapa de isopiezas del entorno del Saladar en 1991 (Rodríguez Estrella et al., 1992)	76
Figura 7.9. Mapa de isopiezas, elaborado a partir de los datos de la campaña de junio de 2004 (Rodríguez Estrella et al., 2008)	76
Figura 7.10. Mapa de isopiezas elaborado a partir de los datos de la campaña de junio de 2005	77
Figura 7.11. Mapa de situación de los puntos de control que conforman la red en enero de 2011	80
Figuras 7.12. Gráfico de evolución mensual del nivel en el piezómetro P-8 (en el saladar), mostrando la explotación de las desaladoras DA-I y DA-II y las lluvias acumuladas durante el periodo mayo-08/enero-11	81
Figuras 7.13. Gráfico de evolución mensual del nivel en el piezómetro P-3 (al oeste del saladar), mostrando la explotación de las desaladoras DA-I y DA-II y las lluvias acumuladas durante el periodo mayo-08/enero-11.	82
Figuras 7.14. Gráfico de evolución mensual del nivel en el piezómetro D-2 (próximo a los bombeos de las desaladoras), mostrando la explotación de las desaladoras DA-I y DA-II y las lluvias acumuladas durante el periodo mayo-08/ enero-11.	82
Figuras 7.15. Evoluciones del nivel en piezómetros ubicados en una línea perpendicular al túnel y situados cada vez más alejados del mismo (P-14, P-1, P-8, P-2, P-3 y P-4, del más próximo al más lejano). Se aprecia que la amplitud de las oscilaciones disminuye conforme los piezómetros se alejan del túnel.	83
Figuras 7.16. Evoluciones piezométricas de los pozos situados junto a las captaciones de la DA-I.	84
Figura 7.17. Evoluciones del nivel en los piezómetros DI-12, D-2, P-8 y P-6, situados, del primero al último, cada vez más próximos al cono de bombeo de la DA-I. Se aprecia que la amplitud de las oscilaciones disminuye conforme los piezómetros se alejan del cono de bombeo.	85
Figura 7.18. Gráfico de evolución mensual del nivel en el piezómetro P-13 (en la línea de costa), mostrando la explotación de las desaladoras DA-I y DA-II y las lluvias acumuladas durante el periodo mayo-08/ enero-11.	86
Figuras 7.19. Evoluciones del nivel en los piezómetros situados en la línea de costa	87
Figuras 7.20. Evoluciones del nivel en los pozos P-31 y P-30	88
Figura 7.21 Mapas de isopiezas correspondientes a marzo de 2008 (izquierda) y enero de 2009 (derecha)	90
Figura 7.22. Mapas de isopiezas correspondientes a enero de 2010 (izquierda) y julio de 2010 (derecha)	90
Figura 7.23. Mapa de isopiezas correspondiente a la campaña de 11 de enero de 2011, con los nuevos puntos de control	92
Figura 7.24. Mapa de isodescensos correspondiente al periodo 03-08/01-09 (izquierda) y 1-09/1-10 (derecha)	94
Figura 7.25. Mapa de isovariaciones piezométricas correspondiente al periodo 1-10 / 7-10 (izquierda) y 7-10 / 1-11 (derecha)	94
Figura 7.26. Ajuste lineal entre la concentración de iones cloruro (mg/l) y la conductividad eléctrica de las muestras de agua estudiadas.	96
Figura 7.27. Evolución de la conductividad eléctrica del agua de mar y de los pozos de extracción P-8, 14, 19 y 26 de la DA-I	99
Figura 7.28. Valores de conductividad eléctrica y temperatura de algunos de los pozos de extracción de la DA-I (Julio de 2009)	100
Figura 7.29. Evolución de la conductividad (mS/cm) y de la temperatura del agua en la cántara de recepción de agua procedente de los pozos de extracción de la desaladora DA-I, para el periodo julio 2004/diciembre 2010.	101
Figura 7.30. Esquema representativo de los valores de conductividad eléctrica obtenidos en la testificación de sondeos de investigación geotécnica realizados en el marco del proyecto de ampliación de la DA-I. Las medidas se realizaron en junio de 2004 (la situación de los sondeos puede verse en el mapa de isopiezas del año 2004, figura 7.9)	102

Figura 7.31. Evolución temporal de la conductividad eléctrica del agua de la cántara de almacenamiento de la DA-II y volúmenes de extracción.	103
Figura 7.32. Evolución de la conductividad eléctrica en profundidad en el piezómetro P-6	105
Figura 7.33. Evolución de la conductividad eléctrica a 10 m de profundidad en el piezómetro P-3.	105
Figura 7.34. Evolución de la conductividad eléctrica en profundidad en el piezómetro P-8	106
Figura 7.35. Evolución de la conductividad eléctrica a 10 m de profundidad en el piezómetro P-1.	107
Figura 7.36. Evolución de la conductividad eléctrica en profundidad en el piezómetro P-11	108
Figura 7.37. Evolución de la conductividad eléctrica a 10 m de profundidad en el piezómetro P-13.	108
Figura 7.38. Evolución de la conductividad del agua del mar	109
Figura 7.39. Evolución de la temperatura del agua del mar.	109
Figura 7.40. Evolución de la conductividad eléctrica en profundidad en el piezómetro DI-18	110
Figura 7.41. Evolución de la conductividad eléctrica a 35 m de profundidad en el piezómetro DI-4.	110
Figura 7.42. Evolución de la conductividad eléctrica en superficie de los pozos P-30 (arriba) y P-31 (abajo)	111
Figura 7.43. Isoconductividades a 10 m de profundidad el 15-5-08, antes del inicio de las extracciones en el túnel (izquierda). Isoconductividades a 10 m de profundidad el 8-1-09 después del inicio de las extracciones en el túnel (derecha)	112
Figura 7.44. Isoconductividades a 10 m de profundidad el 9-01-2010, 15 días después del comienzo de los vertidos sobre el saladar (izquierda). Isoconductividades a 10 m de profundidad el 7-7-2010, 7 meses después del inicio de los vertidos sobre el saladar (derecha)	112
Figura 7.45. Isoconductividades a 10 m de profundidad el 11-1-11, 6 meses después del cese de los vertidos.	113
Figura 7.46. Diagrama de Piper de las 10 muestras analizadas, previo al funcionamiento de las Desaladoras.	117
Figura 7.47. Relaciones entre rNa y rCl de las muestras en distintos escalones del ensayo de bombeo llevado a cabo en cada pozo.	118
Figura 7.48. Diagrama de Piper de las 20 muestras analizadas, con las desaladoras en marcha	119
Figura 7.49. Contenido en nitrato (mg/l) de las muestras (escala logarítmica)	120
Figura 7.50. Relaciones iónicas entre el rNa y el rCl de las muestras	121
Figura 7.51. Relaciones iónicas entre rHCO ₃ y rCl de las muestras.	122
Figura 7.52. Relaciones iónicas entre rNa/(rMg + rCa) y rCl de las muestras	122
Figura 7.53. Relaciones iónicas entre rNa/rK y rCl de las muestras.	123
Figura 7.54. Relaciones iónicas entre rNa/rCa y rCl de las muestras	123
Figura 7.55. Relaciones entre icb y rCl de las muestras.	124
Figura 7.56. Relaciones entre rCl y la conductividad eléctrica de las muestras	125
Figura 7.57. Relaciones entre rSO ₄ y la conductividad eléctrica de las muestras.	125
Figura 7.58. Esquema geológico regional con la distribución de diapiros salinos (en color salmón) en el entorno geológico de la zona de estudio. Modificado de IGME (1985)	126
Figura 7.59. Distribución de líneas de isoconductividad al sur del acuífero costero de Agua Amarga. Rodríguez Estrella et al. (1992)	128
Figura 7.60. Esquema típico de intrusión marina en un acuífero libre con descarga de flujo hacia el mar. Líneas de isoconcentración (izquierda), líneas de corriente (derecha), según Henry (1964)	129
Figura 7.61. Efecto de una lámina de agua de mar impuesta sobre la superficie del saladar. Evolución de la isolíneas de concentración. a): 1 año, b): 5 años y c): 10 años (Alhama et al., 2010c y 2010e)	130
Figura 7.62. Procesos involucrados en los valores de desviación isotópica, referida a ‰ v-SMOW, modificado de Mook (2001)	132
Figura 7.63. Representación de los valores de desviación isotópica de las muestras y de las rectas meteóricas RMV y RMMO.	134

Figura 7.64. Composición isotópica frente a salinidad en la identificación de diferentes procesos de salinización: agua dulce (a), agua mineralizada (b), mezcla de ambas (c), disolución de sal, infiltración y tiempo de residencia (d) y evaporación (e) (Mook, 2001) . . .	135
Figura 7.65. Relación entre la desviación isotópica $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ v-SMOW y la conductividad eléctrica.	135
Figura 7.66. Perfiles de temperatura en profundidad del piezómetro P-6, tomados mensualmente desde mayo de 2008.	137
Figura 7.67. Perfiles de temperatura en profundidad del piezómetro D-2, tomados mensualmente desde mayo de 2008.	137
Figura 7.68. Perfiles de temperatura en profundidad del piezómetro P-11, tomados mensualmente desde mayo de 2008.	138
Figura 7.69. Evolución de la temperatura, a 10 m de profundidad, en el P-13	139
Figura 7.70. Evolución de la temperatura, a 35 m de profundidad, del pozo DI-4.	139
Figura 7.71. Esquema con los elementos del balance hídrico del acuífero costero de Agua Amarga	140
Figura 8.1. Escenario 2-D de intrusión marina en las cercanías de explotaciones salineras. Modelo físico y condiciones de contorno	169
Figura 8.2. Patrones de isoconcentración y función de corriente comunes a los escenarios con explotaciones salineras, 1 y 2, de la tabla 8.4.	170
Figura 8.3. Anagrama de FATSIM-A	171
Figura 8.4. Diagrama de funcionamiento de FATSIM-A.	172
Figura 8.5. Pantalla inicial del programa	173
Figura 8.6. Pantalla de creación de nuevo modelo.	173
Figura 8.7. Réticula del modelo para un mallado de 10×10	174
Figura 8.8. Detalle de información de una celda interior (a) y exterior (b)	174
Figura 8.9. Pantallas de selección de celdas para editar (a) o implementar las condiciones de contorno (b)	174
Figura 8.10. a): Pantalla de edición del tipo de condición de contorno, b): Selección de bordes	174
Figura 8.11. Condiciones de contorno. Advertencia de error en entrada de datos.	175
Figura 8.12. Cuadro de edición de un conjunto de celdas seleccionadas	175
Figura 8.13. Pantalla de edición de circuitos.	176
Figura 8.14. Cuadro de diálogo de introducción de tiempos de simulación y simulación de parámetro	176
Figura 8.15. Numeración de celdas y nodos	177
Figura 8.16. Pantalla del ambiente Pspice con información del proceso de simulación.	178
Figura 8.17. Pantallas de procesamiento de malla para representaciones gráficas y animaciones	179
Figura 8.18. Pantalla para representaciones en MATLAB. a): Opciones de representación, b): Definición de isolíneas.	179
Figura 8.19. Pantalla de generar animaciones a): Formato de especificación, b): Opciones de tipo de archivo.	179
Figura 8.20. Isolíneas típicas del entorno FATSIM-A. a): concentración, b): función de corriente.	180
Figura 8.21. Gráficos MATLAB de las representaciones de la Figura V.29. a): isolíneas de concentración, b): ídem de función de corriente	180
Figura 8.22. Mallado en planta del modelo	181
Figura 8.23. Sección vertical oeste-este, ilustrando las capas del modelo	182
Figura 8.24. Imagen ilustrativa de la distribución de capas del modelo	182
Figura 8.25. Distribución en profundidad de la conductividad hidráulica (sección oeste-este)	183
Figura 8.26. Ilustración 3-D de la cuña de intrusión inicial	185
Figura 8.27. Líneas de isoconcentración y piezometría en las filas 5 (a) y 26 (b)	186
Figura 8.28. Distribución en planta de líneas isopiezas e isoconcentración de la capa 1 del modelo.	187
Figura 8.29. Balance hídrico en los dominios verde y azul de la figura 8.28	187
Figura 8.30. Trayectorias de partículas de flujo en fila 26 (a), columna 45 (b) y dominio completo (c)	188

Figura 8.31. Ilustración de la cuña de intrusión en presencia del saladar	
Figura 8.32. Distribución de isopiezas e isoconcentraciones en una sección vertical (fila 36)	189
Figura 8.33. Distribución en planta de líneas isopiezas e isoconcentración de la capa 1 y trayectoria de partículas	190
Figura 8.34. Trayectoria de dos partículas que parten de la fila 36 (a) y trayectoria en 3-D de diferentes partículas	190
Figura 8.35. Distribución estacionaria de concentraciones del escenario 3	191
Figura 8.36. Isolíneas de concentración y piezometría de la fila 36.	192
Figura 8.37. Distribución en planta de isolíneas y trayectorias de partículas	192
Figura 8.38. Distribución en planta de isolíneas en las capas 3 (izquierda) y 6 (derecha) del modelo.	193
Figura 8.39. Trayectoria de dos partículas situadas inicialmente en la fila 36	193
Figura 8.40. Conjunto típico de trayectorias del escenario 3	194
Figura 8.41. Superficie piezométrica e isopiezas del periodo 1 (antes de las extracciones)	195
Figura 8.42. Superficie piezométrica e isopiezas del final del periodo 2.	195
Figura 8.43. Superficie piezométrica e isopiezas del final del periodo 3	196
Figura 8.44. Superficie de isoconcentración de 10 g/l, periodo 1	196
Figura 8.45. Superficie de isoconcentración de 10 g/l, final del periodo 2	197
Figura 8.46. Superficie de isoconcentración de 10 g/l, final del periodo 3.	197
Figura 8.47. Superficies de isoconcentración 10 g/l (azul), 40 g/l (amarillo) y 70g/l (granate), periodo 1.	198
Figura 8.48. Superficies de isoconcentración 10 g/l (azul), 40 g/l (amarillo) y 70g/l (granate), final del periodo 3.	198
Figura 8.49. Isolíneas de concentración y piezometría en la fila 13 (que incluye a los pozos de la DA-I); final del periodo 3.	199
Figura 8.50. Isolíneas de concentración y piezometría en la columna 43 (que incluye a los pozos de la DA-II); final del periodo 3.	199
Figura 8.51. Trayectorias de las partículas en el escenario 4	199
Figura 8.52 Superficie piezométrica e isopiezas al final de los vertidos (periodo 1, escenario 5)	201
Figura 8.53. Superficie piezométrica e isopiezas durante los vertidos (periodo 1, escenario 5)	201
Figura 8.54. Superficie de isoconcentración de 10 g/l, final del periodo 2 (enero 2011)	202
Figura 8.55. Isolíneas de concentración y piezometría del final del periodo 1, escenario 5.	202
Figura 8.56. Superficies de isoconcentración 10 g/l (azul), 40 g/l (amarillo) y 60g/l (rojo) (final del periodo 2, escenario 5)	203
Figura 8.57. Isolíneas de concentración y piezometría de la sección vertical correspondiente a la fila 36 (final del periodo 2, escenario 5)	204
Figura 8.58. Superficie de isoconcentración de 20 g/l en estado estacionario (periodo 1, escenario 6)	205
Figura 8.59. Superficie de isoconcentración de 20 g/l en estado estacionario (periodo 2, escenario 6)	205
Figura 8.60. Superficie de isoconcentración de 20 g/l en estado estacionario (periodo 3, escenario 6)	206
Figura 8.61. Partículas liberadas sobre la superficie de vertidos en el periodo 3 del escenario 6	206
Figura 8.62. Evolución de la concentración en los puntos de observación de la figura 8.60.	206
Figura 8.63. Valores de conductividad hidráulica de las capas del modelo (figura 8.25) tras la calibración	207
Figura 8.64. Distribución de isopiezas en una sección vertical correspondiente a la fila 40, escenario 4	208
Figura 8.65. Subdivisión del acuífero en zonas para la realización del balance.	209
Figura 8.66. Resultado del balance en el periodo 3 del escenario 4 (izquierda) y en el periodo 1 del escenario 5 (derecha)	209
Figure 9.1. Líneas de isoprofundidad del agua subterránea, campaña enero de 2009	220
Figure 9.2. Agrupación de las parcelas o esteros en zonas a efectos del programa de vertidos	220
Figura 9.3. Resultados de la modelización con SEAWAT. Anterior al vertido (superior) y posterior al vertido (inferior)	221

Figura 9.4. Sistema perimetral de tuberías y bombas en torno al saladar	222
Figura 9.5. Volúmenes totales mensuales vertidos sobre el saladar.	225
Figura 9.6. Líneas de isoprofundidad del agua subterránea, campaña de Julio de 2010.	225

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 3.1. Margas y margocalizas a techo del Messiniense superior. Cantera de áridos, Sierra del Colmenar.	24
Foto 3.2. Fotografías tomadas en canteras de áridos abandonadas de la Sierra del Colmenar. a: Margas abigarradas del Plioceno inferior, b: Areniscas del Plioceno superior sobre margas abigarradas del Plioceno inferior, c: Discordancia angular erosiva de Plioceno superior sobre Plioceno inferior, d: Superficie de omisión con bioturbación y perforación del Plioceno superior sobre el Messiniense.	25
Foto 3.3. Discordancia angular erosiva del Plio-Cuaternario sobre el Plioceno superior. Carretera de acceso a Ciudad de la Luz desde la carretera N-340.	26
Foto 3.4. Calcarenitas del Tirreniense en discordancia sobre el Plioceno	27
Foto 3.5. Calcarenita con numerosas conchas (i) y conglomerado (d) extraídos de las P.H.D	28
Foto 3.6. Falla inversa que superpone las areniscas del Plioceno superior (izquierda de la imagen) sobre los conglomerados del Plioceno-Pleistoceno (derecha de la imagen).	30
Foto 4.1. Detalle del colector de aguas de la Ciudad de la Luz, en la carretera de acceso a ésta desde el kilómetro 734 de la carretera N-340.	35
Foto 4.2. Compuerta de la antigua gola situada bajo la carretera Alicante-Urbanova, que circula entre el saladar y la línea de costa.	35
Foto 4.3. Lapiaz fitokárstico	37
Foto 4.4. Campo de dolinas en el neokarst de El Altet.	40
Foto 4.5. Disolución en diaclasas, como inicio de una dolina; la vegetación contribuye a la karstificación.	40
Foto 4.6. Uvala cubierta de vegetación en Arenas del Sol	41
Foto 4.7. Dolinas, uvalas y diaclasas en las calcarenitas del Tirreniense en Arenas de Sol	41
Foto 4.8. Estratificaciones cruzadas en las dunas fósiles en las proximidades de la boca norte de la DA-II	42
Foto 4.9. Erosión del tipo alveolar o “nido de abejas” en dunas.	42
Foto 5.1. Alineación paralela a la costa de las arquetas de los pozos de extracción de la DA-I	47
Foto 5.2. Detalle de las calcarenitas del Tirreniense perforadas por los pozos de extracción de la DA-I (al fondo)	47
Fotos 6.1. a): boca de entrada, b): boca de salida y conexión con el túnel	53
Fotos 6.2. a) Detalle de la construcción de un pozo inclinado en la base de la boca de entrada y b) Surgencia de agua en una de las captaciones recién finalizadas.	54
Fotos 6.3. a): Técnicos junto al almacén de dovelas del túnel. b): Tren de extracción de tierras perforadas por la tuneladora, c): Acabado del interior del túnel.	53
Fotos 6.4. a): Revestimiento microporoso de las tuberías, b): Máquina de perforación en el interior del túnel. c) Surgencia de agua de mar en uno de los sondeos del interior del túnel	55
Fotos 6.5. a): Ensayo de bombeo en una PHD. b y c): Dos máquinas de PHD trabajando al mismo tiempo	56
Fotos 6.6. a): Tuberías extendidas en tierra. b): Detalle de los orificios circulares	58
Foto 7.1. Cauce de la Rambla de Agua Amarga atravesando los materiales del Messiniense de la Sierra del Colmenar.	67
Foto 7.2. Laguna del Hondo	70
Foto 7.3. Laguna de Balsareta.	71
Foto 7.4. Afloramientos de margas y margo calizas del Plioceno buzando hacia el sur, en la Sierra del Colmenar. Al fondo se ve la depresión del Saladar de Agua Amarga, Urbanova y el mar Mediterráneo.	74
Foto 7.5. Detalle del toma-muestras presurizado en el pozo P-19	115
Foto 7.6 a) Eflorescencias de halita en el cauce de la Rambla de Albatera y b) manantial de agua salada en la rambla de Albatera.	127
Foto 9.1. <i>Limonium furfuraceum</i> (a), albardinales con <i>Limonium</i> spp (b) y Tomillares de <i>Limonium cossonianum</i> y <i>L. santapoleste</i> (c)	215
Foto 9.2. Almarjales de <i>Arthrocnemum macrostachyum</i> (a), ejemplar seco de	

<i>Atriplex halimus</i> en una zona típica de almarjal (b), <i>Sarcocornia</i> junto a línea de costa (c), <i>Suaeda vera</i> y <i>Arthrocnemum macrostachyum</i> (ejemplar color verde) (d)	216
Foto 9.3. Arquetas y bombas de descarga en funcionamiento	222
Fotos 9.4. Detalles de los esteros inundados	226

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Resumen de las características de los pozos de captación de agua subterránea P-1 a P-9 de la DA- I.	44
Tabla 5.2. Resumen de las características de los pozos de captación de agua subterránea P-10 a P-33 de la DA- I.	45
Tabla 6.1. Características de los neodrenes de la DA-II	57
Tabla 6.2. Volúmenes mensuales de agua de mar bombeados en la DA-II y días de parada, para el periodo septiembre de 2008/diciembre de 2010.	60
Tabla 7.1. Características hidrogeológicas de las capas que forman el acuífero costero de Agua Amarga. K: conductividad hidráulica, T: transmisividad, n_e : porosidad eficaz	72
Tabla 7.2. Características de la Red de Control del acuífero costero de Agua Amarga en el entorno del saladar	79
Tabla 7.2. (Continuación). Características de la Red de Control del acuífero costero de Agua Amarga en el entorno del saladar	80
Tabla 7.3. Variaciones de la carga hidráulica con la profundidad en los piezómetros P-4, P-3, D-2 y P-8.	89
Tabla 7.4. Conductividad eléctrica de las muestras tomadas durante los ensayos de bombeo en pozos de abastecimientos de la DA-I y en sondeos de investigación.	98
Tabla 7.5. Resultados de los análisis químicos de las muestras tomadas durante los ensayos de bombeo escalonados.	116
Tabla 7.6. Origen y error calculado mediante balance de cationes en el conjunto de muestras	118
Tabla 7.7. Valores de desviación isotópica de las muestras recogidas en la zona de estudio . .	133
Tabla 7.8. Datos para la elaboración de la RMV, obtenidos a partir de la GNP (www.IAEA.org)	133
Tabla 7.9. Precipitaciones acumuladas durante los años hidrológicos 2007-2010	142
Tabla 7.10. Valores de pp media mensual durante los años hidrológicos 2007-2010	142
Tabla 7.11. Valor de recarga en función de los porcentajes de agua en el suelo estimados	143
Tabla 7.12. Volúmenes de riegos aplicados sobre la superficie del Saladar de Agua Amarga durante el periodo diciembre de 2009 a julio de 2010.	144
Tabla 7.13. Datos para la realización del balance de masas a partir de desviación isotópica con Deuterio.	145
Tabla 7.14. Volumen de agua extraída por el conjunto de los pozos de la DA-I durante el periodo 2006-2009, en función de la profundidad de los mismos.	146
Tabla 7.15. Cuantificación de los términos del balance hídrico considerando los valores de recarga mínimos.	148
Tabla 8.1. Clasificación del agua en función de la concentración salina	155
Tabla 8.2. Significado físico de los grupos adimensionales discriminados.	168
Tabla 8.3. Parámetros hidrogeológicos y geométricos del problema	170
Tabla 8.4. Valores de los parámetros para dos escenarios de intrusión sin explotación salinera .	170
Tabla 8.5. Coordenadas geográficas de los vértices del modelo	181
Tabla 8.6. Conductividades hidráulicas del modelo y su distribución.	183
Tabla 8.7. Parámetros hidrogeológicos del modelo	183
Tabla 8.8. Condiciones de contorno del modelo	184
Tabla 8.9. Cronología de los escenarios 4	194
Tabla 8.10. Cronología de los escenarios 5.	200
Tabla 8.11. Comparación entre valores piezométricos reales y simulados	207
Tabla 8.12. Caudales de trasvase entre zonas del balance.	209
Tabla 9.1. Especies de interés relevante relacionadas con el Saladar de Agua Amarga y su zona de influencia (* denota especie)	215
Tabla 9.2. Hábitats de interés comunitario relacionados con el Saladar de Agua Amarga	216
Tabla 9.3. Hábitats naturales prioritarios relacionados con el Saladar de Agua Amarga	217
Tabla 9.4. Especies de aves prioritarias relacionadas con el Saladar de Agua Amarga	217
Tabla 9.5. Especies animales consideradas como protegidas, raras o en peligro,	

incluidas en listados nacionales e internacionales	218
Tabla 9.6. Volúmenes de riegos vertidos sobre el saladar	224

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

En el verano de 2008, el profesor Rodríguez Estrella, con el que cursé entre otras la asignatura de doctorado ‘Sobreexplotación de acuíferos en el sureste español’, me propuso la realización de una tesis doctoral en el campo de la Hidrogeología. Su objetivo principal era la realización de una síntesis que integrara y ampliase la información existente, para caracterizar y definir el acuífero costero del Saladar de Agua Amarga y los procesos antrópicos y naturales de su entorno. Para ello se haría uso de la experiencia y el conocimiento adquirido durante los años de colaboración y asesoramiento técnico entre la UPCT y la Mancomunidad de los Canales del Taibilla (MCT) en lo referente a las captaciones de las desaladoras de Alicante I (DA-I) y Alicante II (DA-II) y al seguimiento piezométrico y de calidad química del humedal-saladar adyacente. Desde entonces he colaborado estrechamente con el Dr. Rodríguez Estrella en la redacción de informes hidrogeológicos para la MCT relacionados con el saladar; trabajos que dieron lugar, así mismo, a la elaboración de comunicaciones en congresos internacionales relacionados directamente con el tema de esta memoria, Alhama et al. (2010a, 2010b y 2010c). Otras publicaciones en revistas están ahora en fase de elaboración y revisión.

Si bien el escenario del Saladar de Agua Amarga y su entorno es limitado, se trata de un paraje singular, tanto por su Geología (e Hidrología que de ella deriva) como por las sucesivas acciones antrópicas que determinan su estado actual. La información y datos técnicos recopilados a lo largo de muchos años, más los específicamente recogidos para esta tesis en los tres últimos, ha permitido construir un marco adecuado para poder interpretar más que aceptablemente los complejos procesos de flujo y transporte que tienen lugar en el acuífero, derivar los estados previos a la intervención antrópica y predecir la recuperación de los hábitats de interés dentro del humedal integrado en el saladar. La simulación numérica, aunque cualitativa en mayor grado, ha corroborado las conclusiones del trabajo.

En los últimos años he colaborado también en tareas de investigación con el grupo “Simulación por redes” del Departamento de Física Aplicada de la UPCT al que pertenezco, particularmente, en el campo de caracterización de escenarios costeros y geotérmicos mediante la técnica de adimensionalización discriminada de las ecuaciones de gobierno del modelo. Como fruto de esta colaboración he participado también en la elaboración de diferentes

comunicaciones a congresos internacionales (Soto et al. 2007a; Alhama et al. 2010d, 2010e y 2010f), artículos enviados a revistas especializadas (Soto et al. 2006a y 2006b) –algunos en fase de revisión– y dirección de proyectos fin de carrera a alumnos de Obras Públicas, especialidad de hidrología. La aplicación de los modelos de flujo y transporte, desarrollados por el grupo de investigación citado, a la caracterización y simulación del escenario de esta memoria (lo que implicaba un gran número de pruebas y simulaciones), incidió en la idea ya perseguida por el grupo, de desarrollar un código o programa propio que incluyera las características más interesantes de los modernos programas de simulación, usando los modelos desarrollados por el grupo y los algoritmos matemáticos de computación de Pspice (1994). El fruto de este trabajo, constituido en objetivo parcial de esta memoria, es el programa FATSIM-A © (Alhama et al. 2010g) –cuyos derechos de explotación se han cedido a la UPCT– y su libro de aplicaciones docentes y de investigación ‘Uso y aplicaciones del programa de flujo de fluido y transporte de soluto FATSIM-A’, Alhama et al. 2010h.

Merced al ánimo transmitido por el profesor Rodríguez Estrella, mi motivación y satisfacción a lo largo de estos dos últimos años (a los que me he dedicado casi a tiempo completo a elaborar esta memoria) ha ido en aumento en paralelo con mi vocación por la investigación. La tarea no ha sido fácil; la satisfacción, sin embargo, por los objetivos logrados ha compensado el esfuerzo realizado.

1.2. ANTECEDENTES

Durante el periodo 1925-1975, el saladar de Agua Amarga fue utilizado como explotación salinera, evolucionando posteriormente, de forma natural, como zona húmeda expuesta a las invasiones esporádicas del mar durante temporales y a periodos de encharcamiento-desección de acuerdo con los ciclos de lluvias y sequía estacionales. En su superficie se han desarrollado comunidades vegetales singulares propias de un saladar que, al mismo tiempo, se ha convertido en área de campeo o alimentación de avifauna de lagunas próximas. El paraje fue catalogado como Parque Natural Municipal por la Comunidad de Valencia en el año 2005.

En septiembre del 2003, para satisfacer la demanda de agua dulce de Alicante y de Elche, la MCT pone en marcha la desaladora DA-I, que se abastece de agua de mar mediante 33 sondeos verticales ubicados junto a la línea de costa, en la zona norte contigua al saladar. Más tarde, en 2007, se decide la construcción de la nueva desaladora DA-II, ampliación de la anterior. Para evitar el impacto visual que podrían ocasionar nuevos pozos de abastecimiento sobre la superficie de la zona húmeda, se llevó a cabo la construcción de un túnel subterráneo de 1 km de longitud, en dirección Norte-Sur, entre las antiguas salinas y la línea de costa de la playa del Saladar. Esta obra actuaría como dren del acuífero para la captación del agua

subterránea a través de 119 perforaciones inclinadas realizadas en su interior. Por otro lado, para atenuar el impacto sobre los niveles piezométricos en el saladar, se decidió que parte de la demanda fuera cubierta mediante 8 pozos horizontales dirigidos (PHD), situados bajo el lecho marino, que se abastecerían directamente de agua de mar, Rodríguez Estrella et al. (2008).

La protección del ecosistema existente y, por tanto, del acuífero costero infrayacente, requería la supervisión de los niveles piezométricos de cara a controlar posibles afecciones motivadas por la actividad extractiva sobre el mencionado ecosistema. Con este fin, entre septiembre de 2007 y enero de 2011, se diseñó e instaló una red de control piezométrico que cubría la mayor parte del área de interés.

1.3. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Saladar de Agua Amarga se localiza al sur de la provincia de Alicante (sureste de España), en el límite entre los términos municipales de Elche y de Alicante, 6 km al sur de esta ciudad junto a la carretera N-332 y al norte de El Altet, población más cercana (figuras 1.1 y 1.2).

Se trata de una primitiva albufera cuyo paraje se encuentra en una pequeña cuenca endorreica de 1700 ha que se extiende hacia el continente 4,5 km, con ausencia de cauces superficiales y separada del mar por un cordón litoral de arena de 50 m de anchura media y altura media en torno a 2 m. Tiene forma triangular y se encuentra comprendida entre las alineaciones marcadas por la línea de costa, al este, los relieves de la Sierra del Colmenar con altura máxima de 120 m s.n.m., al nor-noroeste, y la alineación que marca las pistas del aeropuerto y la urbanización Urbanova, junto a El Altet, con elevaciones de 20-50 m, al sur. La superficie de saladar ocupa una extensión de 250 ha, con una topografía llana, inclinada hacia el mar, comprendida entre 4,0 y 0,2 m de altitud. Su parte más oriental, junto a la restinga de arena, se encuentra compartimentada en esteros, resultado de la actividad salinera del siglo pasado.



Figura 1.1. Localización geográfica general de la zona de estudio

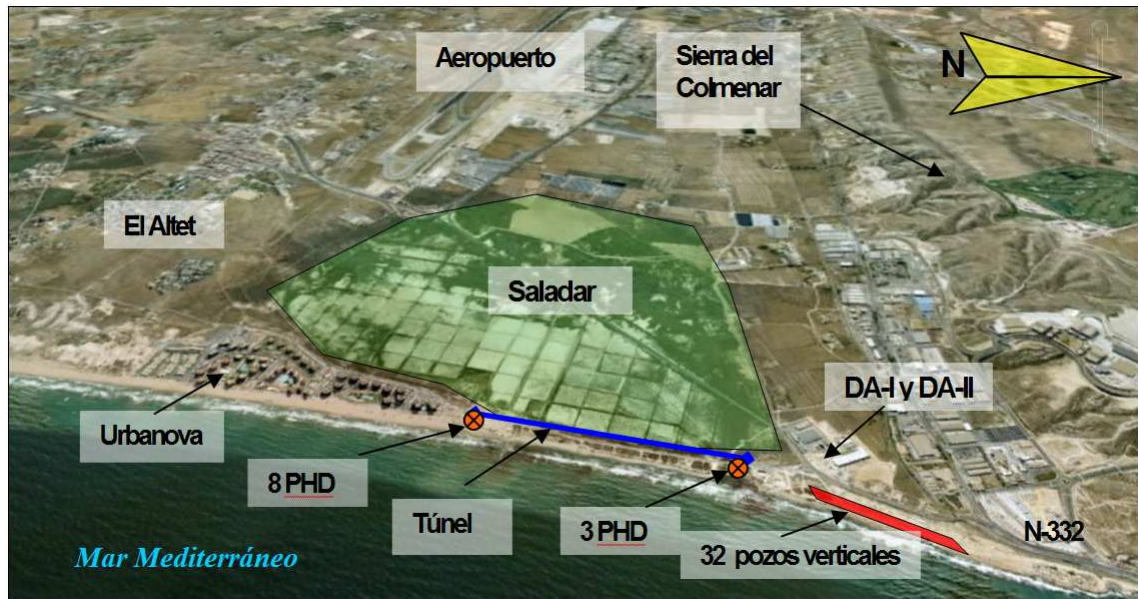


Figura 1.2. Localización geográfica detallada de la zona de estudio

1.4. OBJETIVOS

Esta Tesis Doctoral pretende realizar una integración estructurada de la información existente sobre el acuífero costero del Saladar de Agua Amarga, y ampliar dicha información con objeto de interpretar en términos hidrogeológicos los procesos derivados de las intervenciones antrópicas que han tenido lugar en el mismo. Para abordar este trabajo se plantean los siguientes objetivos:

i) Recopilar y estructurar la información disponible en relación con:

- su historia,
- la Hidrogeología de la zona,
- el conjunto de las obras de las desaladoras y su régimen de funcionamiento,
- la documentación técnica sobre el seguimiento de piezometría y calidad química del acuífero.

Dicha información se extiende en el tiempo desde 1925, fecha de inicio de la explotación salinera, hasta enero de 2011.

ii) Caracterizar hidrogeológica y físicamente el acuífero, a partir de la documentación existente y de las campañas de campo.

iii) Interpretar y valorar la respuesta del acuífero (evolución de la piezometría y salinidad) frente a las distintas acciones externas (lluvias, extracciones y vertidos) en términos de los patrones de flujo y concentración resultantes.

iv) Realizar un balance hídrico global del acuífero para establecer la procedencia del agua de las captaciones.

v) Estudiar la composición isotópica de las aguas de cara a establecer el origen de las mismas y los procesos de mezcla que tienen lugar en el acuífero.

vi) Caracterizar químicamente las aguas subterráneas para:

- identificar los procesos que tienen lugar en el medio acuífero (mezclas de aguas de diferentes orígenes, intercambio iónico agua-terreno, contaminación marina, etc.),
- validar cualitativamente (y en la medida de lo posible cuantitativamente) el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero.

vii) Investigar los factores que condicionan la salinidad de las aguas en la zona de estudio.

viii) Caracterizar físicamente los escenarios de intrusión marina con existencia de saladares próximos, buscando los parámetros adimensionales que los definen a partir de sus modelos matemáticos de flujo y transporte, y utilizando como herramienta numérica el método de simulación por redes.

ix) Elaboración de un modelo numérico 3-D de flujo y transporte con MODFLOW (SEAWAT), que reproduzca, al menos cualitativamente, los patrones de isopiezas e isoconcentraciones de los diferentes escenarios cronológicos de intervención antrópica.

x) Valorar los efectos sobre la salinidad y piezometría del conjunto de intervenciones antrópicas efectuadas sobre el acuífero (actividad salinera, extracciones de agua y vertidos de recuperación), de cara a la preservación de los hábitats que se desarrollan en el mismo.

1.5. METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos, se ha establecido una metodología agrupada en dos categorías; trabajos de campo y trabajos de gabinete.

Los trabajos de campo están encaminados a la adquisición de información geológica e hidrogeológica. Para el conocimiento de la geología del entorno, se plantearon itinerarios en los que se realizaron cortes, levantamientos de columnas, cartografía y fotografías de puntos clave. Por otro lado, para la recopilación de información hidrogeológica, se realizaron inventarios de puntos de agua, campañas mensuales de medición de niveles piezométricos y conductividades y toma de muestras de agua para su posterior análisis químico de elementos mayoritarios y de isótopos estables.

Los trabajos de gabinete se orientan a la recopilación y análisis de la información de la zona de estudio, así como a la elaboración de los datos adquiridos durante los trabajos de campo para, en último término, exponer los resultados y conclusiones alcanzadas. En primer lugar se llevó a cabo una búsqueda de estudios previos de la zona mediante la consulta de la base de datos del IGME y de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ); se recopilaron las publicaciones en revistas científicas, los informes técnicos de la MCT (previos y posteriores a la

construcción de las desaladoras DA-I y DA-II) y la información meteorológica proveniente de distintas fuentes. Posteriormente se trabajó en el análisis de la información bibliográfica recopilada y en las investigaciones de campo realizadas. También se abordó la caracterización 2-D del escenario (intrusión marina con la existencia de un saladar) mediante FATSIM-A (Alhama et al., 2010g) y la elaboración de un modelo conceptual de funcionamiento del acuífero que sirviera de base para su simulación mediante el programa SEAWAT (MODFLOW, 2007).

1.6. PERSPECTIVAS

Las intervenciones llevadas a cabo en el acuífero costero de Agua Amarga son un ejemplo de gestión eficiente de un escenario en el que median intereses tanto económicos (de explotación de recursos) como ecológicos (de conservación medio ambiental). La experiencia adquirida en el proceso de restauración de un humedal costero con condiciones particulares de salinidad, desvinculado de masas superficiales de agua y utilizando un sistema de vertido con agua de mar, se puede plantear (potencialmente) como una alternativa técnicamente viable en otros lugares geográficos con condiciones similares, en los que habrá que valorar las ventajas y los inconvenientes particulares.

En este sentido las perspectivas abiertas con este trabajo, tanto en el campo de las soluciones propuestas para la conservación medioambiental como en el de la simulación numérica, permitirían abordar nuevos escenarios de características similares, tan abundantes en regiones semiáridas de la costa mediterránea. Es quizá una de nuestras tareas futuras.

Por otro lado, en relación con el acuífero de Agua Amarga, queda por investigar: i) la relación hidrogeológica con las masas de agua situadas al sur del saladar (el Salar de la Senieta y el Clot Galvani) y con el cuaternario del Campo de Elche, ii) la piezométrica y caracterización química del acuífero inferior del Messiniense, así como su conexión con el superior del Plioceno-Cuaternario y, iii) la elaboración de un modelo más ambicioso que incorpore este conocimiento.

CAPÍTULO 2

CLIMATOLOGÍA

CAPÍTULO 2

2. CLIMATOLOGÍA

2.1. GENERALIDADES

El clima característico de la zona de estudio está condicionado por la proximidad al mar y por la ausencia de relieves acusados (la altura máxima de 147 m s.n.m. se da en el Macizo de Santa Pola, al sur de la zona de estudio). En la figura 2.1 se muestra la precipitación media anual de la zona para el periodo 1970-2000, mientras que en la figura 2.2 se presenta la temperatura media anual durante el mismo periodo. Ambas figuras se han recogido de la página web: <http://sig.mapa.es>. La temperatura media anual es de 18° (figura 2.2) y las precipitaciones medias están en torno a 285 mm (figura 2.1 y 2.5). La evapotranspiración potencial media es de 896 mm/a (figura 2.7). Según la clasificación climática de Papadakis (1966), el clima es del tipo mediterráneo semiárido subtropical-semicálido.

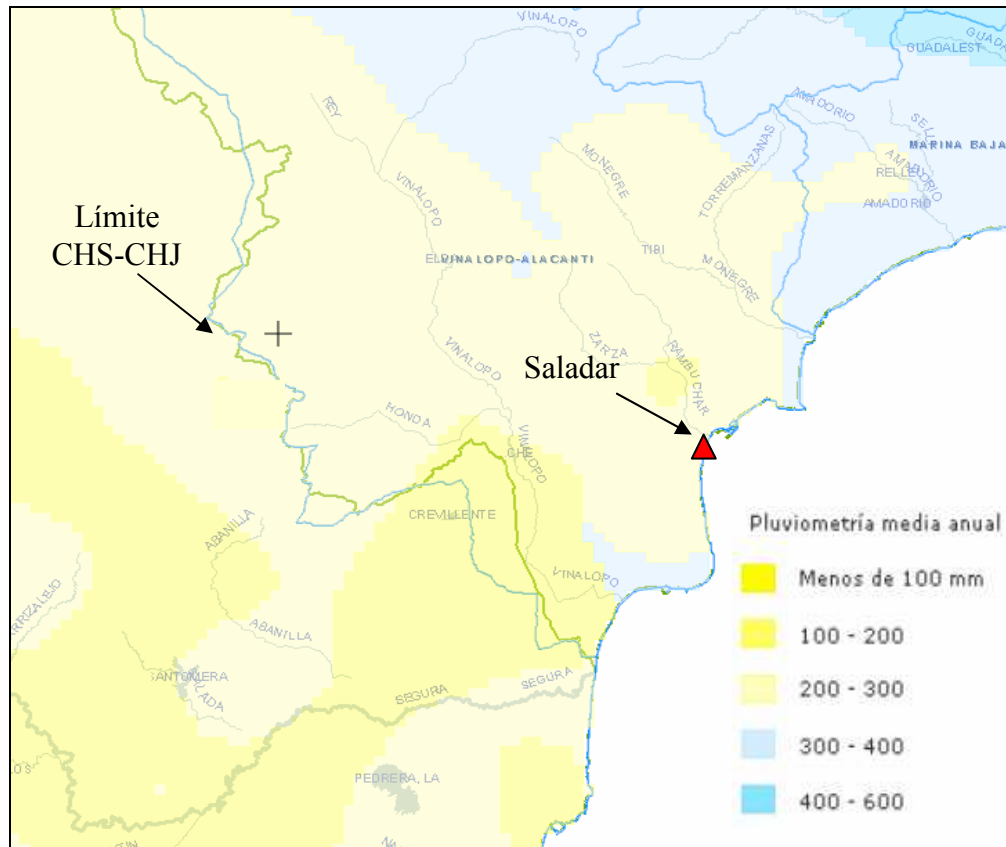


Figura 2.1. Precipitación media anual en mm para el periodo 1970-2000

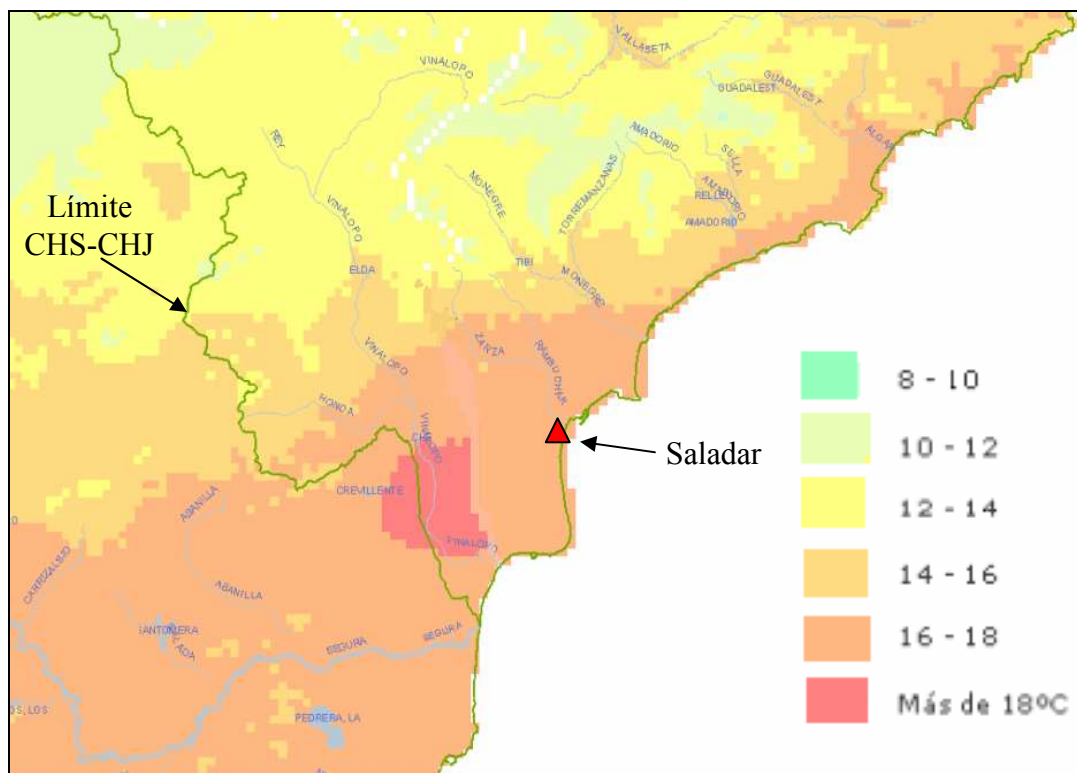


Figura 2.2. Temperatura media anual, en °C para el periodo 1970-2000

2.2. ESTACION PLUVIOMÉTRICA DE 'EL ALTET'. DATOS DE PARTIDA

Para la evaluación de los aspectos climatológicos de la zona, se han utilizados los datos correspondientes al periodo 1967-2003 de la estación termopluviométrica de 'El Altet', situada en el aeropuerto de Alicante, con código de identificación 83600 (LEAL). La estación se sitúa en las coordenadas 38.28 de latitud y -0.55 de longitud, con una altitud de 43 m.s.n.m., separada menos de 2 km de la línea de costa y a 1 km de distancia de la zona de estudio. Los datos climatológicos correspondientes al periodo 2003-2010 se obtuvieron de la web http://www.tutiempo.net/clima/Alicante_El_Altet.

No se consideró necesaria la incorporación de datos procedentes de otras estaciones meteorológicas por varios motivos: por un lado, la pequeña extensión de la zona estudiada (10 km²) y su proximidad a la estación meteorológica de El Altet y, por otro, que los acuíferos de la zona tienen importancia local, según el mapa de unidades hidrogeológicas 1:50.000 de la CHJ (<http://www.chj.es>), quedando probablemente desvinculados de las grandes masas de aguas superficiales próximas (cuenca del Bajo Segura, Cuenca del Vinalopó y cuenca del Río Monnegre (figura 7.2). Esto hace innecesario incorporar datos meteorológicos de más allá de la zona de estudio.

2.3. DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIONES Y TEMPERATURA

Para el análisis de la distribución temporal de las precipitaciones y de la temperatura, se han utilizado los valores medios obtenidos de la serie de 36 años comprendidos entre 1967 y 2003 y disponibles en la web <http://sig.mapa.es>. La primera característica apreciable es el contraste de valores entre la estación seca de verano, con precipitaciones en torno a 26 mm y valores máximos de evapotranspiración potencial en torno a 150 mm, y la estación húmeda en otoño, con valores medios en torno a 120 mm de precipitación (figura 2.3). La proximidad al mar se hace notar en los valores medios estacionales de temperatura, que oscilan entre los 24.3° del verano y los 12° del invierno (figura 2.3). Además, las lluvias tienen un marcado carácter torrencial, sobre todo durante la estación otoñal (figura 2.4), con un valor máximo de 49 mm en 24 h para el periodo estudiado. En cuanto a la distribución temporal de las lluvias para los años analizados, se aprecia cierta irregularidad (figura 2.5), con una distribución sigmoïdal en torno al valor medio, alternando periodos secos (1981-85, 1991-2001 y 2002-06), periodos húmedos (1986-90 y 1996-97) y años húmedos (1980, 1982, 2001 y 2007).

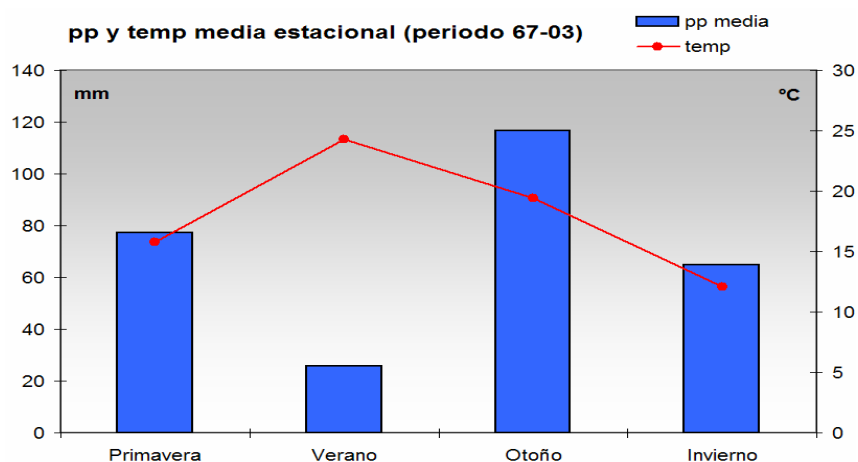


Figura 2.3. Valores medios estacionales de precipitación y temperatura para el periodo 1967-2003

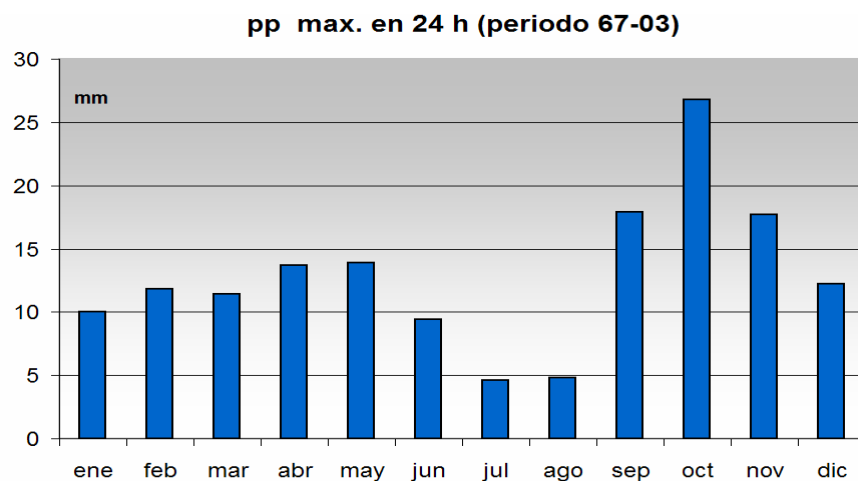


Figura 2.4. Precipitaciones máximas en 24 horas para el periodo 1967-2003

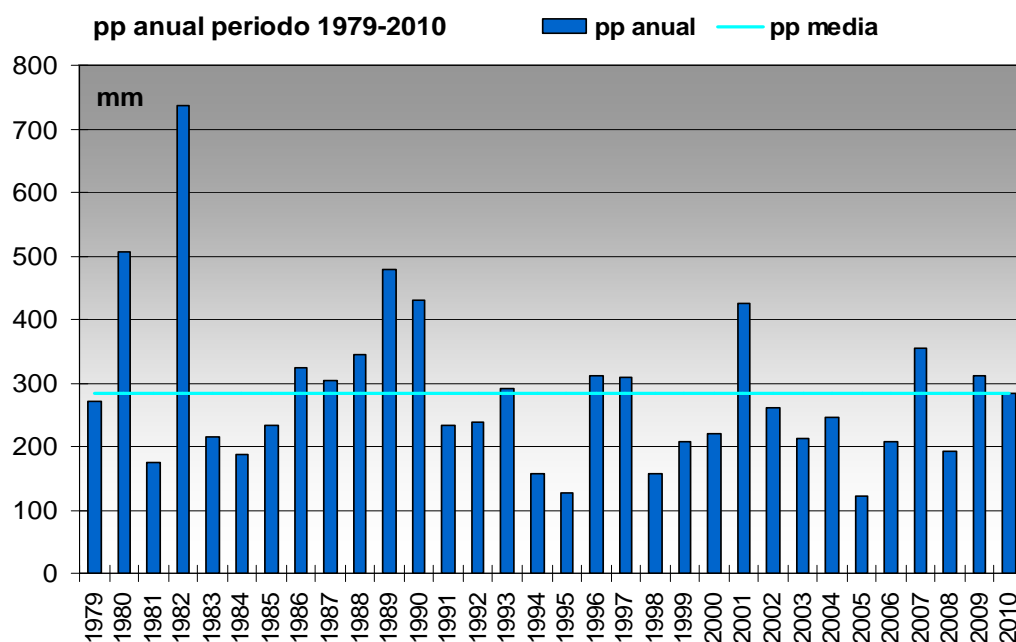


Figura 2.5. Precipitaciones anuales para el periodo 1979-2010

En la figura 2.6 se muestran los valores de pp mensual durante el periodo septiembre de 2007/diciembre de 2010 (<http://www.tutiempo.net>). Esta serie se ha utilizado para la interpretación de las evoluciones piezométricas en el saladar durante el periodo de control mayo 2008/diciembre 2010.

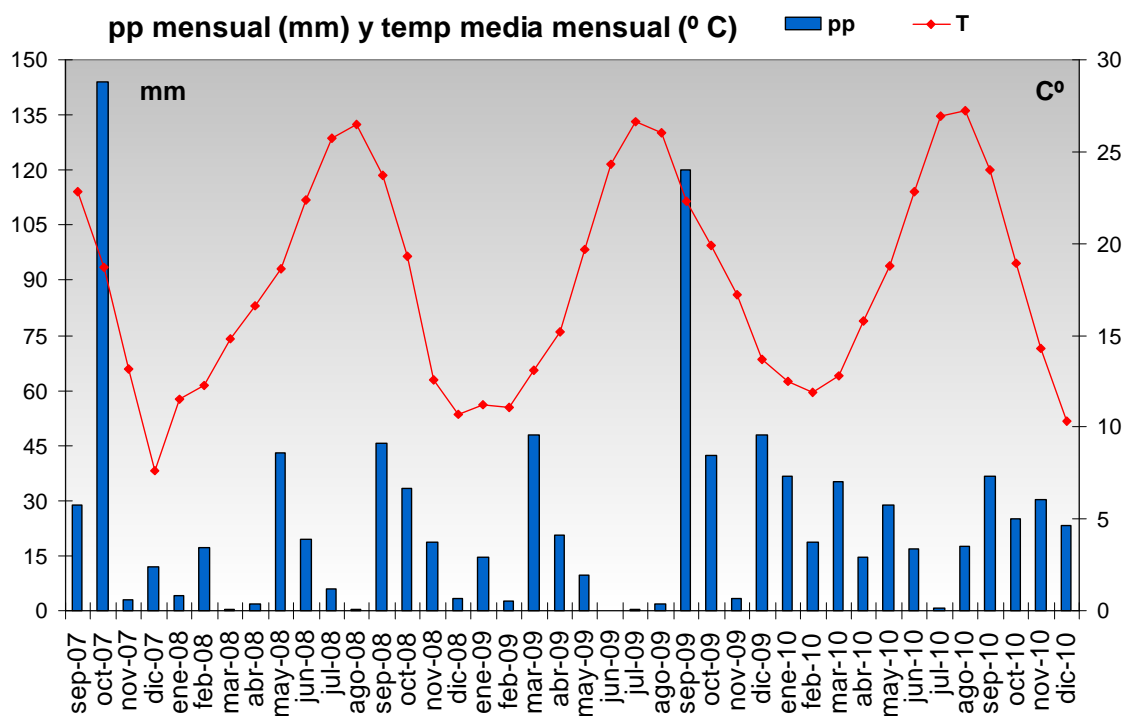


Figura 2.6. Precipitaciones mensuales para el periodo hidrológico 2007-2010

2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Los valores medios de evapotranspiración potencial (ETP) mensual para el periodo 1967-2003 (figura 2.7), han sido calculados mediante el método Thornwaite y se encuentran disponibles en la web <http://sig.mapa.es>. Los mínimos se sitúan en torno a 25 mm y se dan durante los meses de diciembre y enero; los valores máximos se cifran en torno a 150 mm, y se producen durante los meses de julio y agosto. Los balances hídricos del suelo, para el cálculo de la infiltración o lluvia útil (Sección 7.7.2.1), se han realizado diariamente y para los ciclos hidrológicos 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010. Se optó por el análisis diario ya que los análisis mensuales subestiman la infiltración al no contemplar el carácter torrencial de las precipitaciones. Las medidas piezométricas refuerzan esta decisión, puesto que reflejan una recuperación de niveles inmediatamente posterior a los eventos lluviosos. Los valores medios mensuales de ETP calculados para el mismo periodo, mediante el método Thornwaite, se encuentran en el Anexo 9 y en la tabla 7.10.

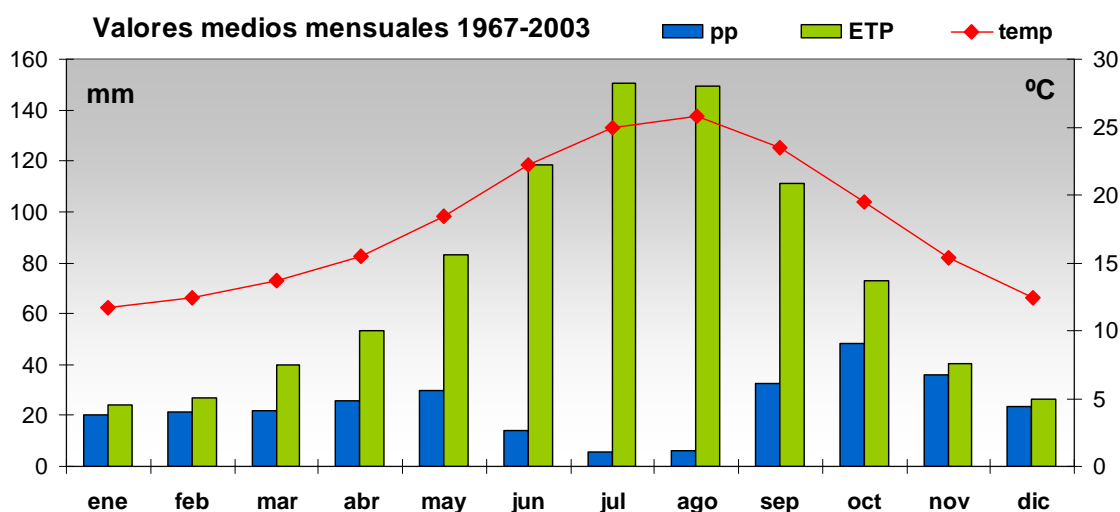


Figura 2.7. Valores medios mensuales de precipitación, temperatura y ETP (Thornwaite) para el periodo 1967-2003

CAPÍTULO 3

GEOLOGÍA

CAPÍTULO 3

3. GEOLOGÍA

3.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Durante el estudio y ejecución de las obras de las Desaladoras de Alicante I y II (DA-I y DA-II) se obtuvo abundante información geológica e hidrogeológica, de carácter cualitativo y cuantitativo, sobre el acuífero costero de Agua Amarga. Ésta procede de: cartografía hidrogeológica, ensayos de bombeo y de infiltración, testigos geotécnicos de más de 50 sondeos, geofísica y campañas de control mensual piezométrico, de conductividad y de temperatura. Todo ello se recogió en los siguientes informes internos de la MCT:

- ‘Informe referente al segundo sondeo de Investigación Hidrogeológica para la desaladora de Alicante’, MCT (2001a). Este sondeo corresponde al actual P-9 de la DA-I.
- ‘Informe referente al tercer sondeo de Investigación Hidrogeológica para la desaladora de Alicante: Sondeo P-1’, MCT (2001b). Este sondeo corresponde al actual P-3 de la DA-I.
- ‘Informe referente a la realización de un aforo conjunto para la desaladora de Alicante: Sondeos P-I, P-II Y P-III’, MCT (2001c). Estos sondeos corresponden con los actuales P-3, P-6 y P-9, respectivamente, de la DA-I.
- ‘Informe referente a los sondeos P-1, P-2, P-4, P-5, P-7, P-8, P-10, P- 11, P-12, P-13, P-15, P-17 de la desaladora de Alicante’, MCT (2002).
- ‘Informe referente a los cuatro nuevos sondeos de explotación P-19, P-20, P-21 y P-22 en la desaladora de Alicante’, MCT (2004).
- ‘Proyecto de ampliación de la desaladora de la Mancomunidad de los Canales del Taibilla en Alicante. Nueva Desaladora del Canal de Alicante (AC/Alicante). Documento nº 1; Memoria y Anejos. Estudio hidrogeológico’, MCT-MMA y U.T.E. (2005),
- ‘Estudio Hidrogeológico de las obras de captación de la Desaladora de Alicante II. Noviembre 2008’, MCT-UPCT (2008).

Otros documentos, de referencia para el estudio de la geología de la zona, han sido obtenidos de la base de datos del IGME (www.igme.es):

- *Mapa geológico de España. E. 1:50.000.* Hoja 893, Elche. Ministerio de Industria. IGME (1973).
- *Mapa Hidrogeológico de España. E. 1:200.000.* Hoja 73, Alicante. Ministerio de Industria y Energía. IGME (1983).
- *Mapa Hidrogeológico de España. E. 1:200.000.* Hoja 72, Elche. Ministerio de Industria y Energía. IGME (1985).
- *Existencia de un Neokarst cuaternario en las proximidades del aeropuerto de Alicante.* Rodríguez Estrella et al. (1992).
- *Viabilidad del Almacenamiento Subterráneo y Recuperación (ASR) de aguas residuales en el Campo de Elche.* I.G.M.E. y DPA (1994).

Además, se han consultado otras fuentes de investigación (artículos, libros) que son citados en el desarrollo del texto.

Para completar la información bibliográfica, se realizaron campañas de campo con itinerarios geológicos durante los años 2009 y 2010 que cubrieron un área rectangular de 35 km², desde la cara norte de la Sierra del Colmenar hasta la altura de Arenales de Sol y desde la línea de costa hasta las inmediaciones de Torrellano.

3.2. ENCUADRE GEOLÓGICO-REGIONAL

Geológicamente, la zona de estudio y su entorno se localizan dentro de las Cordilleras Béticas y más concretamente en la depresión postectónica de Elche-Bajo Segura. El registro sedimentario de la fosa de Elche y el reparto espacial de los distintos ambientes de depósito, de carácter marcadamente marino, están condicionados por la neotectónica, la paleogeografía, los cambios eustáticos y la subsidencia. La síntesis tectonosedimentaria que arranca tras la fase sinorogénica del Tortoniense medio, ha sido descrita por diversos autores (Montenat, 1973; Rodríguez Estrella, 1979; Goy y Zazo, 1988; Goy et al., 1990; Soria et al., 2001; Caracuel et al., 2005) y queda reflejada en la figura 3.1.

En el área de estudio están representadas al norte la Zona Prebética (concretamente el dominio paleogeográfico del Prebético Meridional) y al sur la Zona Bética, que está oculta bajo las potentes formaciones detríticas neógenas de la cuenca postectónica de Elche-Bajo Segura. Ambas zonas están separadas por la Falla de Crevillente (Falla de Cádiz-Álcala) que ha provocado la desaparición de la Zona Subbética en nuestra transversal (figura 3.2.),

apareciendo los afloramientos más cercanos a algo más de 25 km al oeste, concretamente en la Sierra de Crevillente (Rodríguez Estrella, 1979).

El Prebético de Alicante o Prebético Meridional está formado por facies neríticas y pelágicas, representadas por margas, calizas margosas y margas arenosas, de edades comprendidas entre el Cretácico y el Eoceno, Azema (1977); si bien también afloran materiales del Jurásico, pero por causas tectónicas (extrusiones de las sierra de Fontcalent y Sierra Mediana), según Rodríguez Estrella (1977 a, b y c). Los afloramientos de este Prebético aparecen inmediatamente al norte de la Sierra del Colmenar, ya fuera de la zona de estudio.

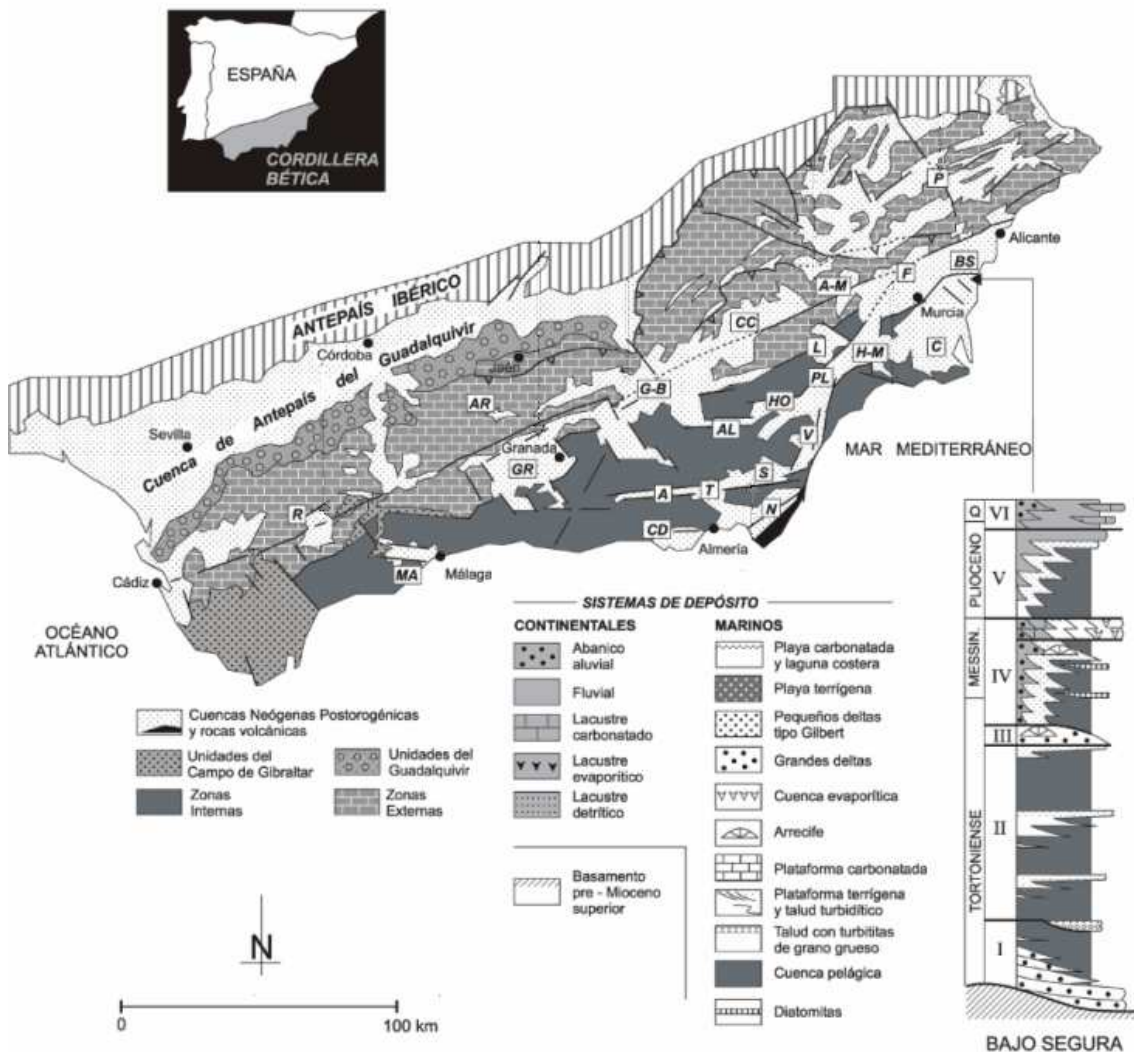


Figura 3.1. Situación de la cuenca del Bajo Segura (BS) dentro del contexto de las Cordilleras Béticas. Síntesis de las secuencias sedimentarias. I: Secuencias Transgresivas; II: Depósitos Progradantes; III: Secuencia Regresiva; IV: Secuencias Transgresivas y Depósitos Progradantes; V: Transgresión seguida de Regresión y VII: Depósitos continentales (Vera, 2004)

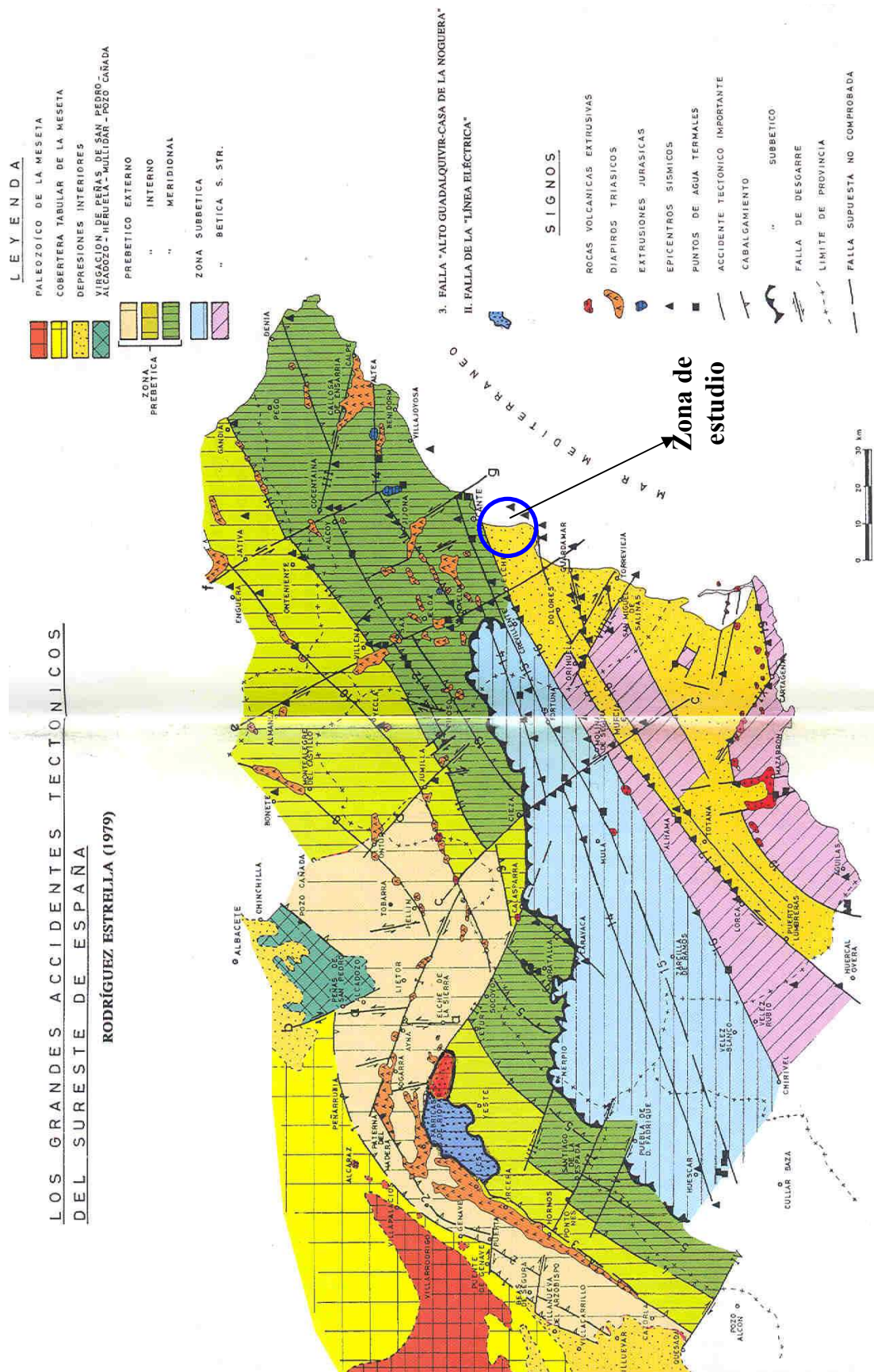


Figura 3.2. Esquema geológico regional del Sureste Español (Rodríguez Estrella, 1979)

El Bético, que aflora más al oeste en las Sierras de Orihuela y Callosa de Segura, en el entorno del Aeropuerto y el Saladar se sitúa a una profundidad de 900-1000 metros (IGME-DPA, 1994); hacia el sur, se encuentra más superficial (400 m en Santa Pola) hasta aflorar en la Isla de Tabarca (figura 3.4).

Los sedimentos post-manto de la cuenca Elche-Bajo Segura conforman la mayor parte de los materiales que aparecen en la zona de estudio. Son formaciones del Neógeno-Cuaternario que se apoyan discordantemente sobre los materiales del Prebético y Bético. Como la mayoría de las cuencas cenozoicas postorogénicas, se encuentra sometida a hundimiento por la extensión Mioceno-Cuaternaria, Viñals et al. (2001). Su relleno es la consecuencia de una sedimentación casi continua de rocas predominantemente marinas que comienza en el Tortoniense superior y acaba en el Cuaternario, Goy et al. (1990). Las series presentan variaciones laterales de facies verificables a todas las escalas, lo que ha dificultado la correlación entre capas en los reconocimientos de campo. Las unidades sedimentarias más relevantes se muestran en las figuras 3.3. y 3.4 y se ilustran con detalle en el Anexo 1.

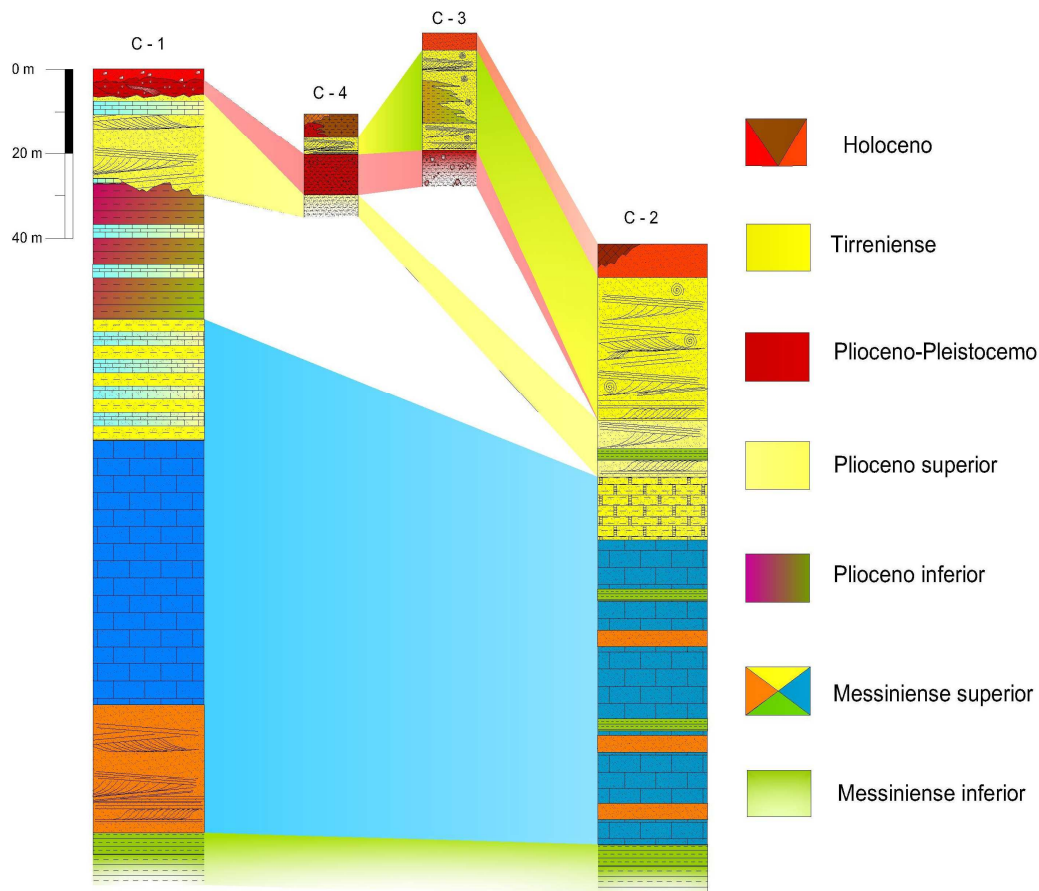


Figura 3.3. Correlación de las series de: Sierra del Colmenar (C-1), El Saladar (C-4), Cala Calabarda (C-2) y Playa del Saladar (C-3)

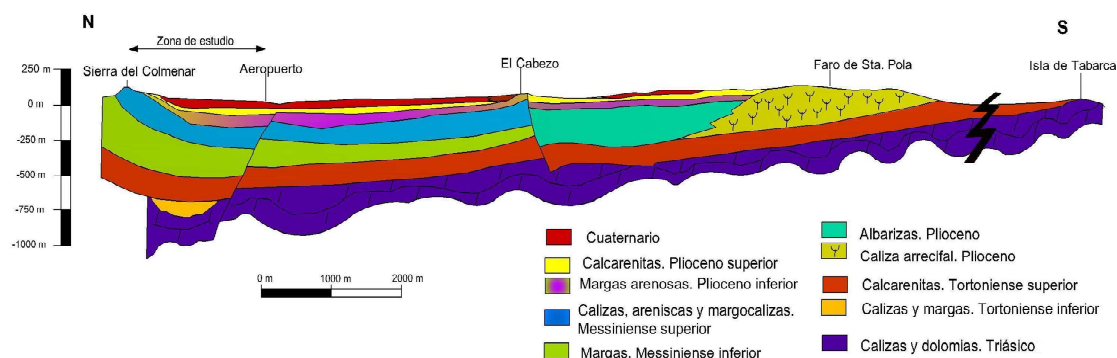


Figura 3.4. Corte geológico del entorno de la zona de estudio, con el Subbético en la base de los sedimentos post-manto. Modificado de IGME-DPA (1994)

3.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS GENERALES DEL CAMPO DE ELCHE

La depresión de Elche-Bajo Segura se localiza en el sector nororiental de la Vega Baja del Río Segura, dentro del marco geológico de las Cordilleras Béticas, y constituye una fosa tectónica; su formación, junto con la de otras cuencas neógenas localizadas en la costa mediterránea, está asociada a la etapa extensional oligoceno-neógena que desencadenó la creación y estructuración del Surco de Valencia, con geometrías de Horst y Graben características del proceso de Rifting. La morfología poligonal y los rasgos estructurales de estas cuencas responden a la disposición de conjuntos de fallas heredados de la fase de orogénesis.

Los sedimentos de la fosa pertenecen al periodo Mioceno superior-Cuaternario, fase post-orogénica y neotectónica del desarrollo de las Cordilleras Béticas. Durante este periodo las directrices principales que configuran el orógeno ya han quedado establecidas y la tectónica estará relacionada con los movimientos de acercamiento entre la Placa Africana y la Ibérica (Vera, 2004).

Según los datos de geofísica realizados por la Diputación de Alicante (1987), Rodríguez Estrella et al. (1992) dedujeron una serie de fallas normales, de dirección N 55-65 E (figura 3.5) que, en general, hundien los bloques más meridionales (buzan hacia el centro del Campo de Elche) pero, a partir de un momento, estas fallas tienen vergencia norte y se van levantando los bloques del sur, hasta llegar a aflorar los materiales del Plioceno y del Messiniense en la Sierras del Molar y de Santa Pola. Dichos bloques levantados, coincidentes con las sierras referidas, son fáciles de deducir, ya que afloran los materiales terciarios; sin embargo, existe otro bloque subaflorante que viene delimitado al norte por una falla, cuya traza pasaría próxima a las pedanías de la Hoya y Baya, y al sur por otra falla que condiciona el límite septentrional de la laguna del Bras del Port (de ahí su borde lineal y su morfología alargada, en oposición, por ejemplo, con la forma redondeada de la laguna del Hondo). Esta

última falla, que hunde el bloque de la laguna, sigue actuando en la actualidad, con lo que provoca la subsidencia de la misma y evita su colmatación. El bloque levantado de Santa Pola no termina con el límite septentrional de la sierra, sino que continúa hasta el Aeropuerto del Altet, aunque ya no aflora apenas el Terciario; sin embargo, esta zona levantada está ocupada por caliches que han originado un neokarst.

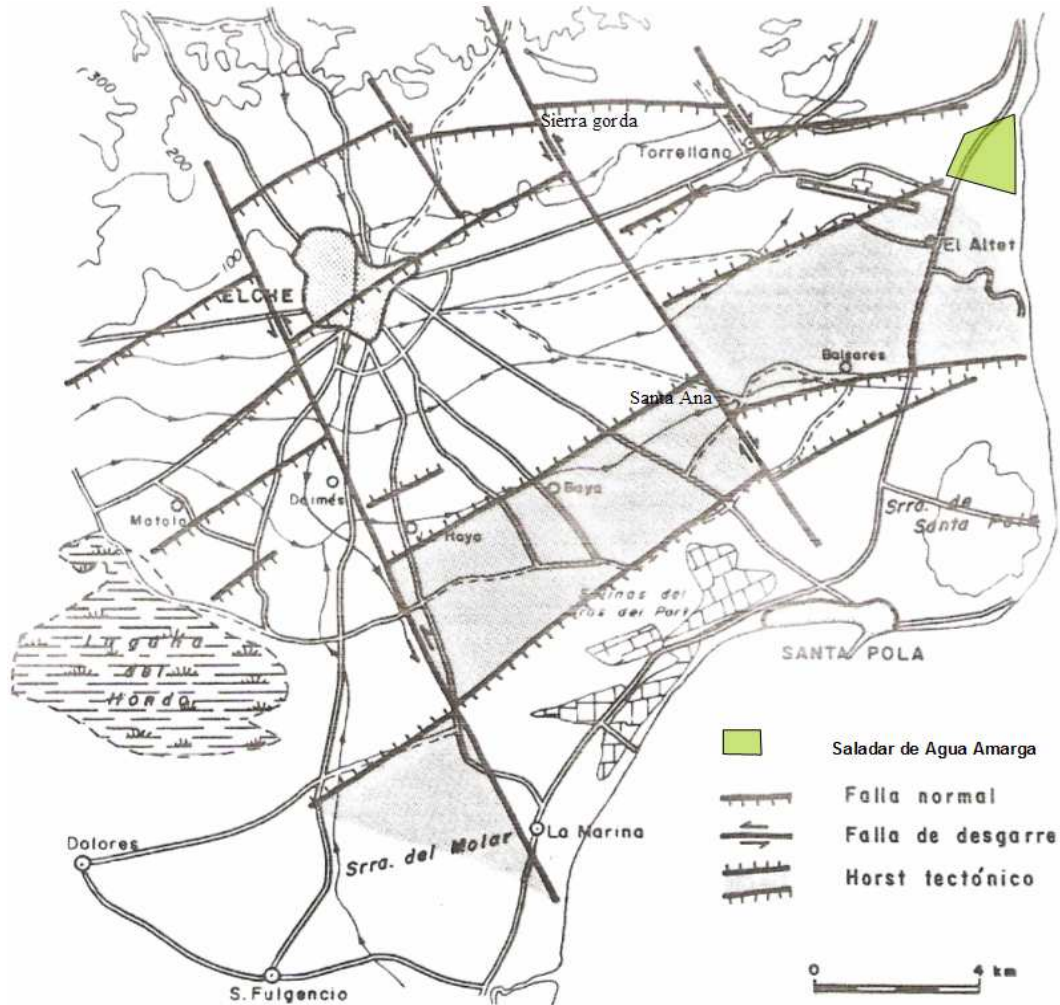


Figura 3.5. Accidentes tectónicos en el Campo de Elche (Rodríguez Estrella et al., 1992)

Otro lote de fallas son las que presentan una dirección N 115-125 E (entre las que destacan la del Barranco de Elche y la de Santa Ana) que poseen un carácter de desgarre: las más cortas, que sólo afectan a los materiales miocénicos de las sierras del norte, son del tipo dextrorsum; esto se aprecia al observar cómo el horst de la Sierra del Molar queda situado más al sur que el subafloramiento de Baya y éste, a su vez, más retrasado que el del Altet. Los desgarres del tipo dextrorsum son más antiguos que los del tipo sinestrorsum, pues estos últimos afectan a materiales más modernos. Puede ocurrir que una misma falla actúe con distinto signo en cada momento; así por ejemplo, la de Santa Ana actuó primero como

dextrógira (véase por ejemplo el arrastre de Sierra Gorda) y después como levógira. Estos dos lotes de fallas forman un ángulo de 60°. Los desgarres del tipo dextrorsum obedecen a un esfuerzo de compresión de dirección aproximada N-S y los del tipo sinestrorsum a esfuerzos de dirección W-E.

3.4. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO: SALADAR DE AGUA AMARGA Y ALREDEDORES

El estudio del entorno geológico se abordó complementando la información adquirida durante las campañas de campo con la obtenida en la revisión bibliográfica. La figura 3.6 muestra el mapa geológico de la zona de estudio; en él se han situado las columnas litológicas de la figura 3.3 y las cortes geológicos I-I' y II-II' (figura 3.7)

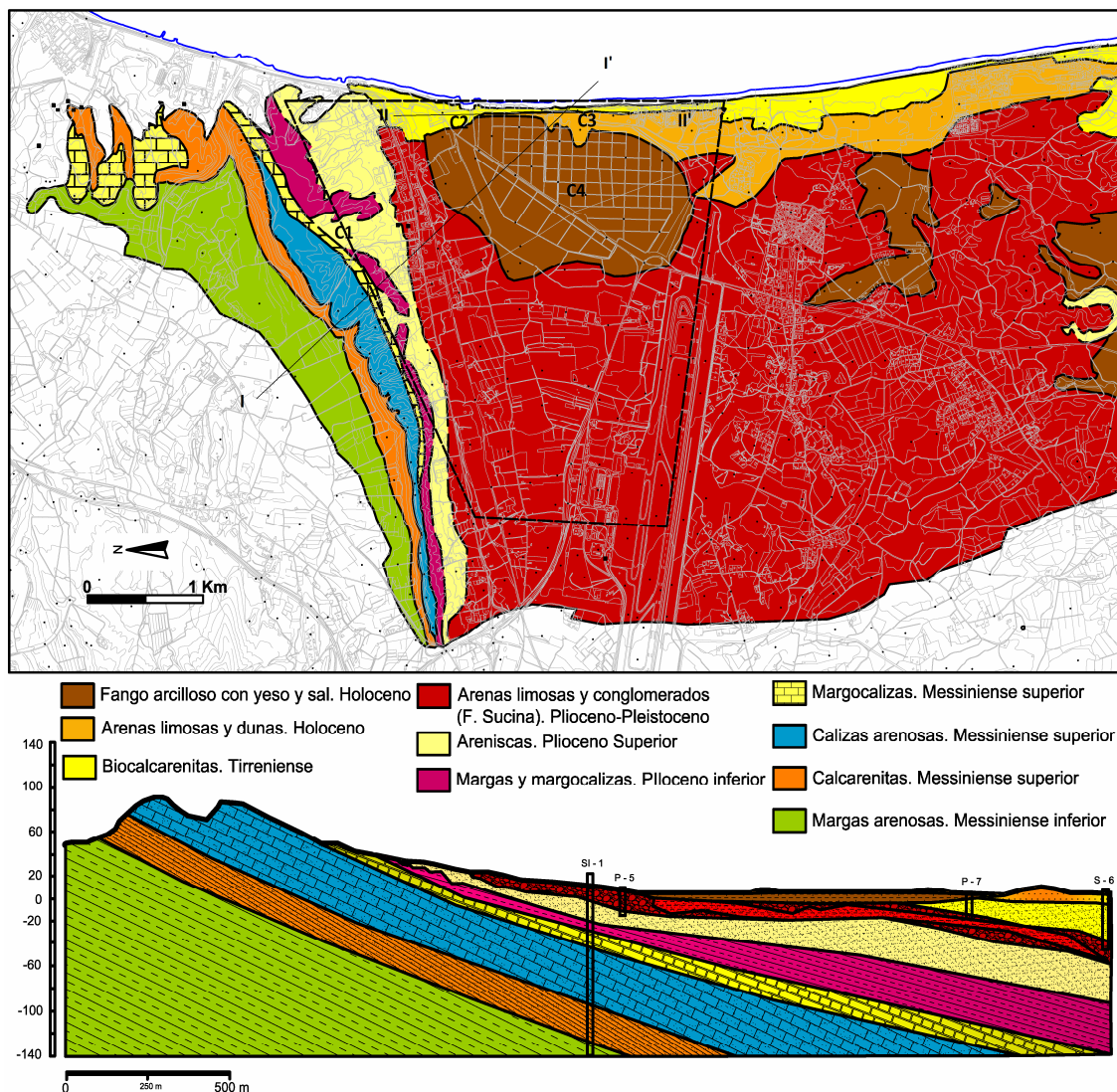


Figura 3.6. Mapa geológico de la zona de estudio y corte geológico I-I', realizados a partir de la información recogida en la campaña de campo e integrando la información de sondeos

3.4.1. ESTRATIGRAFÍA

3.4.1.1. Tortoniense superior

Reposa en discordancia angular sobre la serie Triásica bética. Aflora al norte, en la Sierra del Colmenar, donde presenta buzamientos del orden de 30 grados hacia el sur-sureste debido a la subsidencia Plio-Cuaternaria de la Cuenca de Elche; al Sur, aflora en la Isla de Tabarca y bajo los acantilados de Santa Pola (figura 3.4). La litología presenta notables variaciones laterales relacionadas no sólo con las diferentes profundidades de sedimentación, sino también con los distintos aportes locales. En su parte basal está constituida por conglomerados de transición marino-continental formados a partir de las rocas subyacentes, que interdigitan lateralmente con paquetes de 125-200 m de calcarenitas con niveles margosos propios de ambiente de plataforma marina, IGME (1973). En la zona de estudio, al noreste del aeropuerto, el Tortoniense superior se encuentra por debajo de los 500 metros de profundidad, IGME-DPA (1994). El Tortoniense inferior no aflora en el entorno del Saladar.

3.4.1.2. Messiniense (Andaluciense)

Descansa discordantemente sobre el Tortoniense superior y aflora en la Sierra del Colmenar (figura 3.6), en la ladera sur del Cabezo y Sierra de Santa Pola. En la parte norte está constituido, de techo a muro, por paquetes de margocalizas (foto 3.1), calizas arenosas, areniscas calcáreas margosas (litofacie más extendida) y niveles de conglomerados calcáreos con matriz margo-arcillosa para el Messiniense superior, y por margas (amarillas, grises y verdes), margas limosas y arenas margosas, para el Messiniense inferior. Hacia el sur, el conjunto experimenta variaciones laterales de facies hacia términos más margocalizos y, en las proximidades de la Sierra de Santa Pola, se produce un cambio lateral de facies a sedimentos más carbonatados, representados por areniscas calcáreas blandas (albarizas) y calizas de facies arrecifales, Goy y Zazo (1988). Se estima una potencia media de la serie entre 150 y 200 m, pudiendo cortarse el techo de la formación a una profundidad en torno a 150 en la zona del aeropuerto, IGME-DPA (1994).



Foto 3.1. Margas y margocalizas a techo del Messiniense superior. Cantera de áridos, Sierra del Colmenar

3.4.1.3. Plioceno

El Plioceno inferior está constituido casi esencialmente por margocalizas y reposa en conformidad sobre el Andaluciense (foto 3.2a.), mientras que el Plioceno superior está compuesto por calcarenitas con niveles de margocaliza, Montenat (1973). Estas últimas se encuentran distribuidas ampliamente y de modo continuo, de E-O, en la zona de estudio, y desde la base de la Sierra de Colmenar hasta la parte septentrional de la Sierra de Santa Pola. En el norte, el Plioceno superior está constituido más bien por areniscas calcáreas (foto 3.2b), reposando en discordancia angular sobre el Messiniense y el Plioceno inferior (foto 3.2c y 3.2d), mientras que al sur varía lateralmente, apreciándose términos más margoso-calcáreos correspondientes a una etapa transgresiva, IGME (1973).

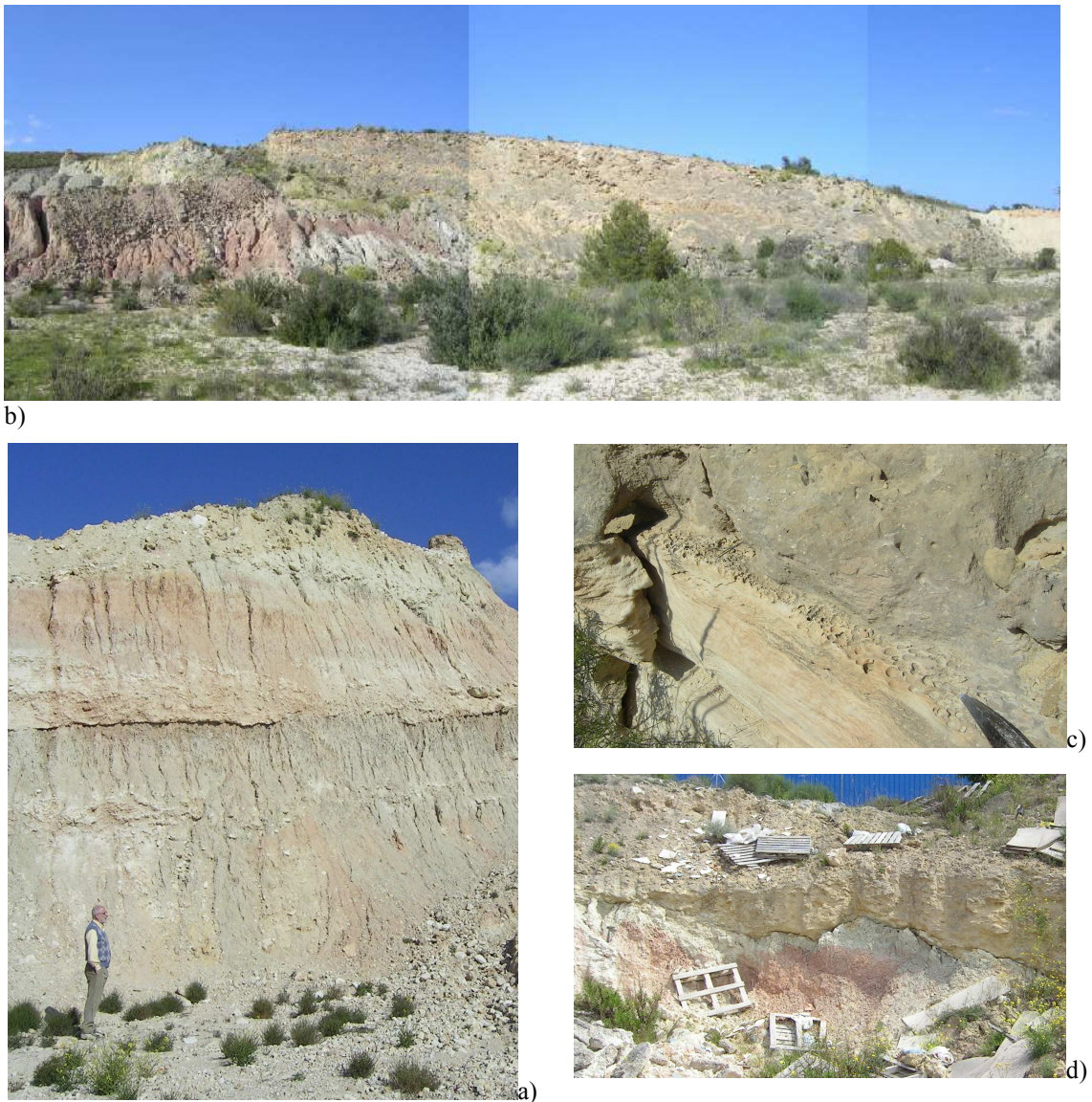


Foto 3.2. Fotografías tomadas en canteras de áridos abandonadas de la Sierra del Colmenar. a: Margas abigarradas del Plioceno inferior, b: Areniscas del Plioceno superior sobre margas abigarradas del Plioceno inferior, c: Discordancia angular erosiva de Plioceno superior sobre Plioceno inferior, d: Superficie de omisión con bioturbación y perforación del Plioceno superior sobre el Messiniense

En la zona del Saladar, el Plioceno inferior tiene un espesor que oscila entre 20-30 metros, mientras que el Plioceno superior presenta una potencia comprendida entre 20 y 70 metros; ambos se acuñan en la Sierra del Colmenar. La extensión de los materiales del Plioceno inferior es más restringida, sin que lleguen a aparecer en los sondeos de los pozos de extracción de la DA-I. Probablemente fueran erosionados antes de que se depositaran sedimentos más modernos, o bien la cuenca receptora abarcara menor superficie durante este periodo. El techo de la formación en la zona del Aeropuerto se puede cortar a profundidad aproximada de 50 metros, IGME-DPA (1994).

3.4.1.4. Plio-Cuaternario

Durante este periodo, la depresión comprendida entre los relieves de Santa Pola y el Colmenar estuvo emergida y se depositaron materiales de carácter continental que se extienden ampliamente por el sector central de esta zona, buzando suavemente hacia el sureste, IGME (1973), en discordancia sobre sedimentos infrayacentes más antiguos (foto 3.3). Se trata de una secuencia de limos arcillosos de color rojizo con intercalaciones de arena, grava y caliche y, localmente, limos blanquecinos con niveles de calizas de carácter lacustre. Estos materiales se refieren en la literatura como ‘Formación Sucina’, Montenat (1973), y tienen espesores medios en torno a 15 metros, pudiendo alcanzar en la zona del Aeropuerto los 60 metros, IGME-DPA (1994). Lateralmente hacia el oeste estos materiales se intercalan con los sedimentos aluviales del Vinalopó y los glaciares desarrollados desde el pie de los relieves situados al norte de la depresión de Elche.



Foto 3.3. Discordancia angular erosiva del Plio-Cuaternario sobre el Plioceno superior. Carretera de acceso a Ciudad de la Luz desde la carretera N-340

3.4.1.5. Pleistoceno (Tirreniense)

Se localiza en la franja costera y está compuesto por calcarenitas oolíticas y conglomerados de origen marino que aparecen cerca de la playa del Altet, Goy y Zazo (1988)

y Dumas (1977), que descansan discordantemente sobre las areniscas del Plioceno superior, en la zona de captación de la DA-I (foto 3.4).



Foto 3.4. Calcarenitas del Tirreniense en discordancia sobre el Plioceno

El Tirreniense se interna al menos 600 metros en el mar, MCT-MMA y U.T.E. (2005), en cuyo fondo podemos encontrar relieves rocosos asociados a estas areniscas. Hacia el continente se produce un cambio lateral de facies a limos blanquecinos y arenas limosas de grano fino, propios de ambientes de marisma y 'lagoon', separados por una restinga de islas-barreras, playas y dunas (figura 3.7). El espesor de la serie aumenta de norte a sur, desde los 20 m en la zona de la playa de Calabarda hasta 50 m al sur de Urbanova (figura 3.8).

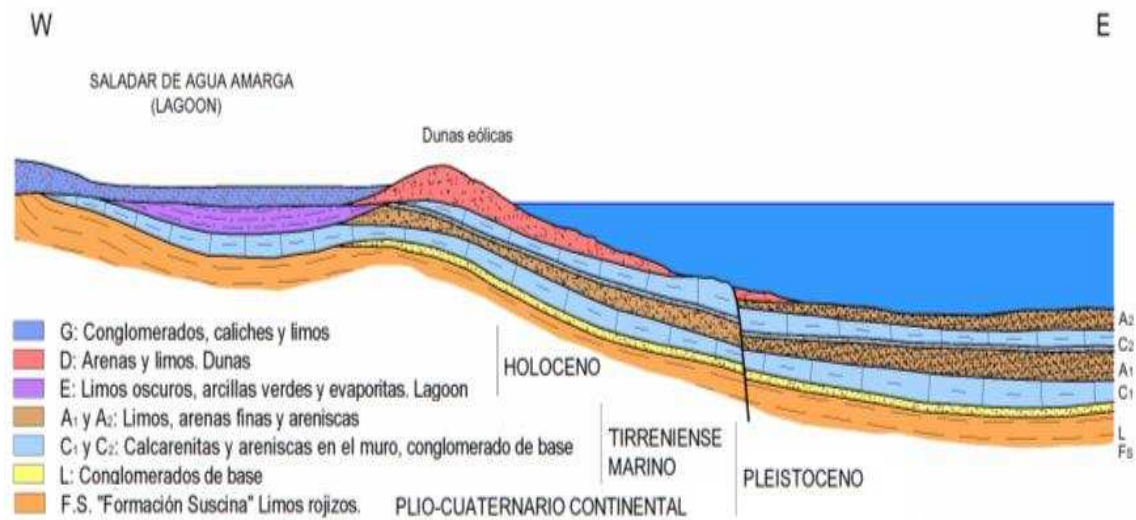


Figura 3.7. Corte geológico oeste-este, perpendicular a la línea de costa a la altura del Saladar

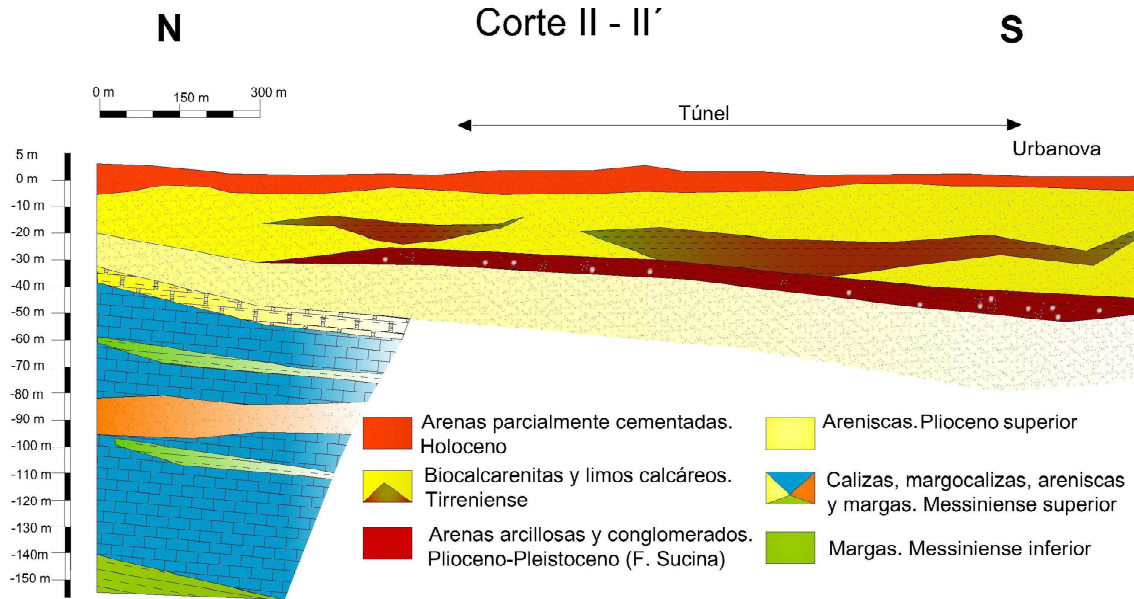


Figura 3.8. Corte geológico N-S de la zona de estudio paralelo a la costa. Se ha integrado la información de 12 sondeos geotécnicos y más de 30 sondeos a rotoperusión

La naturaleza litológica del Tirreniense quedó definida durante la fase de construcción de la DA-II, en la que pudo establecerse la existencia de cuatro tramos (figura 3.7) que en orden descendente son:

- A₂: un máximo de 5 m de limos, arenas y areniscas finas,
- C₂: entre 5 y 10 m de calcarenitas y areniscas de grano medio,
- A₁: entre 8 y 10 m de limos, arenas y areniscas finas, y
- C₁: hasta 15 m de calcarenitas oolíticas de grano grueso karstificadas y conglomerados (foto 3.5.)



Foto 3.5. Calcarenita con numerosas conchas (i) y conglomerado (d) extraídos de las P.H.D.

El espesor conjunto se incrementa de norte a sur, alcanzando entre Urbanova y Arenales del Sol los 60 m de potencia en su zona central, constituyendo así un surco sedimentario (figura 3.9). Los dos tramos carbonatados presentan a muro un conglomerado de

base (L), que representa el inicio de una transgresión marina. El Pleistoceno descansa sobre la Formación Sucina y sobre el Plioceno (Rodríguez Estrella et al., 2008).

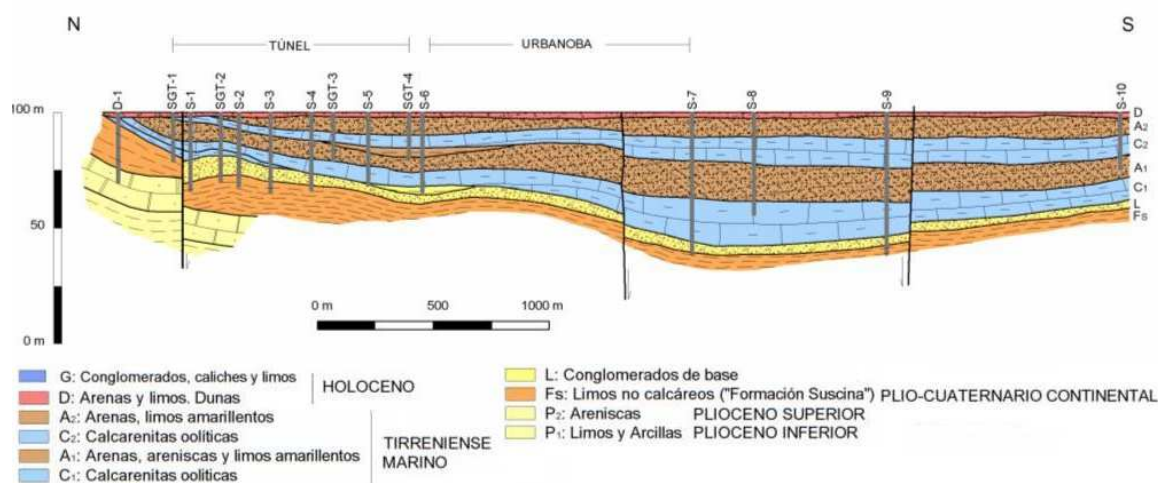


Figura 3.9. Corte geológico paralelo a la costa (Rodríguez Estrella et al., 2008)

3.4.1.6. Holoceno

El Cuaternario más reciente lo forman las dunas eólicas y arenas de la franja costera, que se extienden desde El Altet hasta Santa Pola, los coluviones procedentes de barrancos situados al sur de la Sierra del Colmenar, los fangos arcillo-limosos con sal en la zona del saladar de Agua Amarga, que alcanzan espesores de hasta 6 metros, y los suelos desarrollados en la superficie.

3.4.2. TECTÓNICA Y NEOTECTÓNICA

Diversos trabajos ponen de manifiesto la actividad neotectónica del sector comprendido entre Santa Pola y la Sierra del Colmenar (Montenat, 1973; Rodríguez Estrella et al., 1992; IGME-DPA, 1994 y MCT-UPCT y U.T.E., 2005).

Existen tres estructuras anticlinales de dirección oeste-este que conforman los relieves de la Sierra de Santa Pola, el cerro de El Cabezo-Arenales de Sol y El Altet (Rodríguez Estrella et al., 1992). Estas estructuras son activas al menos desde el Plioceno, lo cual se constata por un lado por la edad de las terrazas marinas colgadas encontradas en Arenales de Sol y en los acantilados de Santa Pola, de hasta 90 metros de altura (IGME, 1973; Bruckner, 1986; Goy y Zazo, 1988), y por otro, por los afloramientos de caliches cuaternarios encontrados en El Altet, que reposan sobre margas del Plioceno inferior, habiendo sido erosionado el Plioceno superior (Rodríguez Estrella et al., 1992). Los tres ejes sinclinales asociados a las estructuras mencionadas se sitúan en el Clot Galvani, el Salar de la Senieta y el Saladar de Agua Amarga.

Las directrices de las estructuras mencionadas están en consonancia con unos esfuerzos de dirección norte-sur, afirmación contrastada con la existencia de fallas inversas de dirección ENE-WSW en la Sierra del Colmenar, afectando a conglomerados del Pleistoceno y que, por su inclinación (mayor de 70°), parecen haberse generado como fallas normales que posteriormente han rejugado como inversas, incluso como retrocabalgamientos (foto 3.6).



Foto 3.6. Falla inversa que superpone las areniscas del Plioceno superior (izquierda de la imagen) sobre los conglomerados del Plioceno-Pleistoceno (derecha de la imagen)

Otras estructuras importantes ligadas a la neotectónica son los juegos de diaclasas verticalizadas, encontradas en sedimentos cuaternarios del Altet (caliches) y cuyas direcciones principales son N25E y N145E (ver figura 7.4), y pliegues de dirección norte-sur ligados a una dirección de esfuerzos oeste-este (Rodríguez Estrella et al., 1992). Además, se han encontrado fallas normales de zócalo de dirección predominante N70E, que llegan incluso a afectar a materiales cuaternarios (calcarenitas del Tirreniense y caliches del Pleistoceno), responsables en parte de la existencia de zonas hundidas y levantadas, y cuya acción ha originado la aparición de surcos-sinclinales separados por umbrales-anticlinales, como consecuencia de la acomodación del relieve a las morfología del subsuelo (Rodríguez Estrella et al., 2008).

De esta forma, el anticlinal de El Altet pudiera tratarse de un pliegue de acomodación a las estructuras de horst y fallas normales que afectan a las series inferiores y que han condicionado la sedimentación neógena.

Entre El Altet y la Sierra del Colmenar queda así una zona deprimida donde se dan los mayores espesores de sedimentos y las mayores profundidades de los techos de las capas, constituyendo un sinclinal con cierre periclinal hacia el oeste, que se inclina hacia el mar con un ángulo inferior a 10° , (Rodríguez Estrella et al., 2008 y MCT-UPCT y U.T.E., 2005). Esta información está contrastada con datos gravimétricos, geofísicos y eléctricos (IGME-DPA, 1994).

El buzamiento de las capas neógenas en la Sierra del Colmenar es de 25-35° hacia el sur en la parte occidental y de 10-20 ° hacia sur-sureste en la parte más oriental, suavizándose hacia el sur hasta invertir el sentido en la Sierra de Santa Pola, con valores en torno a los 20 ° hacia el norte. El Cuaternario presenta valores más suaves de buzamiento con el mismo sentido, lo cual, unido al aumento de espesor de las capas en la zona del Aeropuerto, constata que la depresión del Saladar se encuentra sometida a cierta subsidencia.

En el resto de la Cuenca de Elche, la mayor parte de los sedimentos neógenos se encuentran suavemente plegados por el efecto de la subsidencia de la cuenca desde el Burdigaliense hasta prácticamente la actualidad (Sanjaume, 1985). Esta hipótesis se ve apoyada por algunos indicios, como son la ausencia de terrazas aluviales en el curso inferior del Segura, la presencia de restos endorreicos de pequeñas lagunas salobres y la inclinación suave de las series cuaternarias hacia el centro de la cuenca (Montenat, 1990), aunque en parte este fenómeno se ve compensado por los aportes continentales (Goy et al., 1990). Otro factor que condiciona el carácter subsidente de la cuenca es la falla de desgarre regional de Crevillente o de Cadiz-Alicante que pone en contacto el Prebético con el Bético sobre el que se desarrolla la cuenca. Esta fractura funciona desde el Neógeno como una falla normal con bloque meridional hundido (Rodríguez Estrella, 1979).

Existe una neotectónica que afecta a las calcarenitas del Tirreniense que, igual que ocurre en la zona del Aeropuerto, presentan un neokarst de dolinas y uvalas. Esta neotectónica se traduce en numerosas diaclasas verticalizadas de dirección predominante N 70 E.

CAPÍTULO 4

GEOMORFOLOGÍA

CAPÍTULO 4

4. GEOMORFOLOGÍA

4.1. RELIEVE

La zona de estudio viene limitada al norte por la Sierra del Colmenar, de dirección casi W-E, cuyo punto más elevado es el vértice geodésico de Colmenares (85 m s.n.m.); y al sur, por la Sierra de Santa Pola (sin dirección preferencial), con el vértice geodésico del mismo nombre (165 m s.n.m.). Entre ambos existe una llanura con unos 20 m s.n.m. de media, sobre la que resaltan pequeños montículos, como el de Balsares (49 m s.n.m.) o Patacón (46 m s.n.m.). La figura 4.1 muestra un mapa topográfico de la zona de estudio.

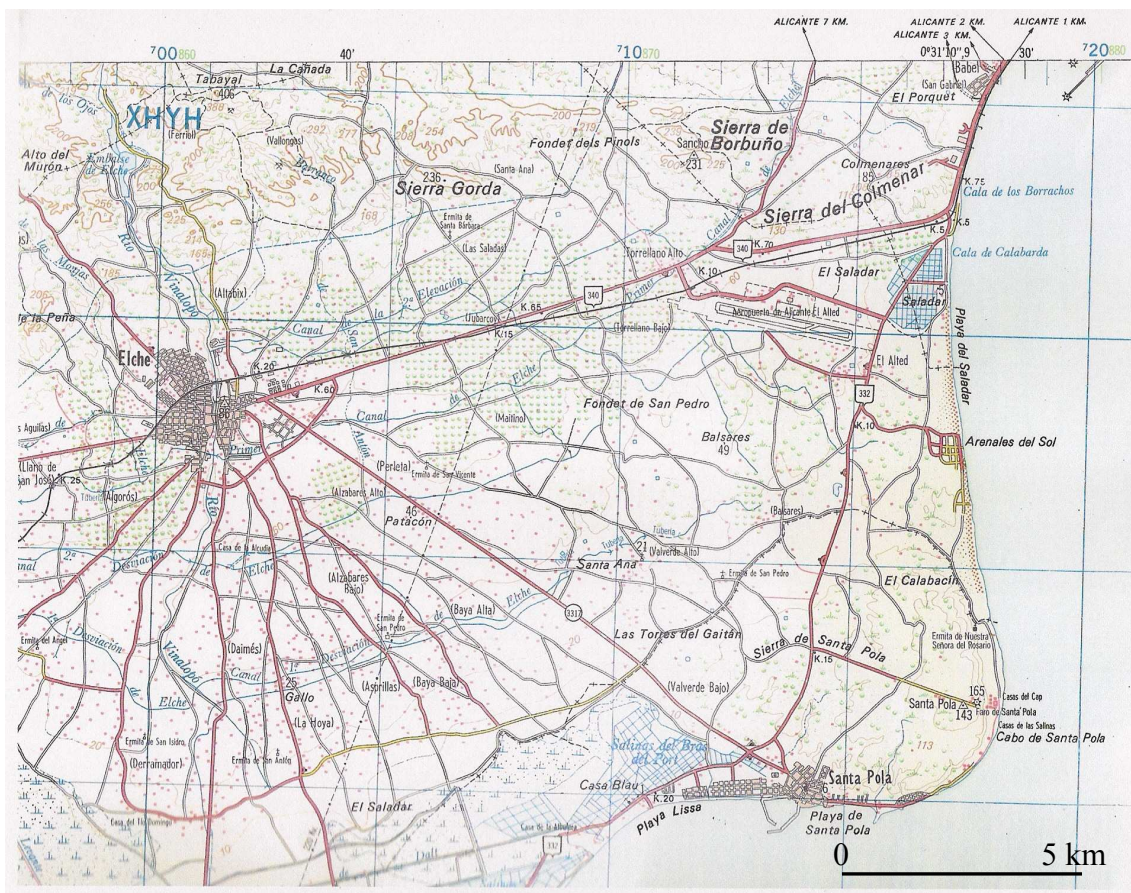


Figura 4.1. Mapa topográfico de la zona de estudio

4.2. HIDROLOGÍA

El Saladar de Agua Amarga y su entorno próximo conforman una pequeña cuenca endorreica en la que la red de drenaje se presenta muy difusa y es irrelevante, estando a su vez muy condicionada por la actividad antrópica. Los cauces superficiales se hacen evidentes en la ladera sur de la Sierra del Colmenar, presentando barrancos alineados en dirección NO-SE que descargan las aguas hacia el saladar. Con motivo de las obras de la Ciudad de la Luz, situada en la cima de la parte más oriental de la referida sierra, se construyó un colector para las aguas superficiales (foto 4.1) procedentes de los barrancos comprendidos entre la línea de costa y el punto kilométrico 734 de la carretera N-340, cuya descarga se produce directamente al mar.



Foto 4.1. Detalle del colector de aguas de la Ciudad de la Luz, en la carretera de acceso a ésta desde el kilómetro 734 de la carretera N-340

La superficie del saladar, que originariamente funcionó como una albufera (‘senderos de la sal’, www.medioambiente.ladipu.com), se encuentra compartimentada en esteros circundados por canales, resultados de la actividad salinera que se desarrolló el siglo pasado. La entrada de agua de mar se producía desde dos golas cuyos restos son visibles bajo la carretera que transcurre entre el saladar y la línea de costa (foto 4.2).



Foto 4.2. Compuerta de la antigua gola situada bajo la carretera Alicante-Urbanova, que circula entre el saladar y la línea de costa

La salida de agua procedente de la lluvia se realizaba a través de un canal circundante al saladar que descargaba al mar en la Cala de Calabarda, situada en la parte noreste del saladar, a la altura de las oficinas de las desaladoras. Parte de la descarga también se llevaba a cabo por las propias golas. Estas canalizaciones se encuentran hoy día anegadas, por lo que las aguas de lluvia y escorrentía, que van a parar al saladar desde su entorno, se infiltran en el acuífero, se evaporan o constituyen ‘láminas de temporales’ de agua sobre la superficie del saladar, particularmente cuando las lluvias son torrenciales.

4.3. FORMAS KÁRSTICAS

En realidad se trata de formas neokársticas, pues todas ellas están relacionadas con materiales carbonatados del Plio-Cuaternario o del Pleistoceno; concretamente caliches de la Formación Sucina y calcarenitas oolíticas del Tirreniense.

4.3.1. NEOKARST EN LOS CALICHES DE LA FORMACIÓN SUCINA

Ha sido estudiado por Rodríguez Estrella et al. (1992). Según estos autores sólo aparecen formas exokársticas de escaso desarrollo.

Las formaciones carbonatadas karstificadas en España están constituidas, fundamentalmente, por rocas sedimentarias del Mesozoico, Paleozoico y Cenozoico (Durán, 1989), siendo escasos los karst desarrollados en materiales más modernos. Aunque han sido descritos algunos ejemplos de este modelado en la Cordillera Ibérica y Cataluña (Gutiérrez y Peña, 1989), asociados a depósitos aluviales pliocuaternarios y cuaternarios, son aún más raras y singulares las formaciones carbonatadas de estas edades afectadas por los procesos de disolución kárstica, como es el caso del caliche aflorante en las proximidades de El Altet. Las características litoestratigráficas y topográficas confieren unos rasgos distintivos al modelado de esta área, diferenciándolo de los karst típicos del Levante, bien representados en los macizos del Monduver, Mariola, Gallinera, etc.

El karst se localiza en un afloramiento que presenta una topografía amesetada, con una altitud media de 30 m. Aunque existen formas endokársticas a altitudes similares en la zona costera levantina (Cava del Vell, en la Comarca de la Sabor, a 40 m; Sima del Pedreguer, a 70 m), los campos de dolinas no aparecen hasta los 150 m.

Teniendo en cuenta que los caliches están afectados por una neotectónica ascensional poco intensa, nos encontramos ante un karst cuaternario (neokarst) que presenta formas exokársticas sencillas y relativamente bien conservadas, a las que no se han superpuesto otras fases de karstificación ni los procesos de jerarquización fluvial. El karst está representado, en consecuencia, por formas simples de absorción, fundamentalmente dolinas

(Figura 4.5). Por otro lado, la escasa potencia de los sedimentos carbonatados supone un obstáculo para el desarrollo de formas endokársticas.

En cuanto a la distribución de las formas, hay que decir que al oeste de Balsares se encuentran los dos únicos ejemplos de uvalas reconocidos y dos pequeñas dolinas, y que al norte del sector, se sitúan dos depresiones aisladas, mientras que en las proximidades de El Altet, existe un campo de dolinas (figura 4.2) bien desarrollado (dividido en dos grupos por la rambla de la Planisa. Por último, hay que mencionar el conjunto formado por la dolina estructural de la laguna de Balsareta y tres formas de absorción simples más, situadas al este del núcleo de Balsares. Esta distribución del modelado kárstico en la zona estudiada puede parecer, en principio, aleatoria; sin embargo, la mayor densidad de polinización en el área comprendida entre El Altet y Balsares es debida fundamentalmente a la mayor cota topográfica existente en este sector en relación con los adyacentes (ha habido un levantamiento mayor) y a la gran fracturación que presentan aquí los caliches. La existencia de una zona de mayor absorción en este sector permite el desarrollo de estas formas, mientras que en los afloramientos próximos a las zonas más deprimidas, el nivel piezométrico se encuentra muy elevado, lo que dificultaría el desarrollo del exokarst.

Además de las dolinas, entre las formas del modelado kárstico se ha reconocido un lapiaz de origen fitokárstico (foto 4.3) desarrollado por la acción directa de la vegetación, descrito por Garay (1990), en el macizo de Monduver. Se trata de surcos de anchura centimétrica, sinuosos y dendríticos. Generalmente este tipo de lapiaz se encuentra cubierto y ha podido ser observado en el sector de Balsares, donde se han realizado recientemente repoblaciones forestales.



Foto 4.3. Lapiaz fitokárstico

En este neokarst, cuyas características bioclimáticas y litológicas son poco aptas para el desarrollo de los procesos de karstificación, la topografía es un factor determinante en la génesis del modelado: el aplanamiento de los afloramientos de caliche dificulta la jerarquización fluvial de la esorrentía, favoreciendo, por el contrario, su estancamiento e infiltración a favor de la intensa red de fracturación.

De los tres tipos genéticos de dolinas definidos por Maire (1980), en la zona estudiada sólo se ha reconocido la dolina de disolución o solución (Nicod, 1972), originada, como indica su nombre, a partir de la disolución de los caliches, favorecida por el complejo sistema de fracturas que los afectan, y que han hecho posible la denudación de estas rocas carbonatadas. Con el fin de analizar las características genéticas y evolutivas de neokarst, se han aplicado modelos estadísticos al campo de dolinas existente entre El Altet y Balsares, donde se alcanza una densidad de dolinización de 5,75 (figura 4.2). Las formas, de acuerdo con el índice de Williams (1972) superior a 2 en esta área, se distribuyen según modelos regulares, controlados por factores específicos. Comparando la orientación del eje mayor de las dolinas con los resultados obtenidos en el diagrama de orientación de fracturas, se comprueba la influencia estructural en la génesis de estas depresiones. Hay que diferenciar entre aquellas cuyo eje presenta una orientación casi N-S (17,6%), perpendicular al esfuerzo máximo O-E (se adaptarían a fracturas de distensión), del resto de dolinas, formadas a partir de las fracturas de dirección N25E y N145E. La simetría de las depresiones, puesta de manifiesto al aplicar el producto de simetría (P_s : <2), que indica el grado en que el sumidero se encuentra desplazado del centro geométrico de la depresión y por tanto la existencia o no de factores que condicionan el desarrollo de los ejes en un sentido u otro, confirma el control de estos sistemas de fracturas en la evolución de las formas.

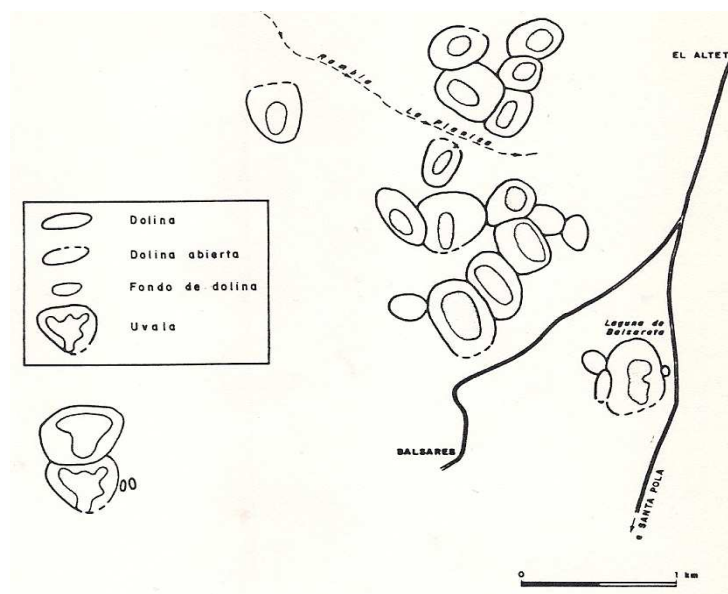


Figura 4.2. Campo de dolinas entre El Altet y Balsares

Siguiendo criterios morfológicos, estas formas se encuadran en el tipo de ‘dolinas de cuvette’ o artesa (Maire, 1980), caracterizadas por presentar una escasa profundidad, no superior a los 3 m, con fondos amplios y planos y una dimensiones superficiales medias de $25 \times 15 \text{ m}^2$. Este modelado suele estar asociado a zonas con una topografía amesetada (karst de las calizas de los páramos en la cuenca del Ebro o karst ligados a las superficies de erosión en la Cordillera Ibérica). La escasa potencia del caliche ha sido, por otro lado, un factor determinante en la morfología de las dolinas; los borde suelen ser asimétricos, debido a la presencia de fracturas en una ladera de las dolinas, mientras que las restantes tienen escasa pendiente, sin presentar rasgos de karstificación.

La ausencia de sumideros y el hecho de que, en ocasiones, en el fondo afloren materiales impermeables margosos del Plioceno superior, indica una clara evolución hacia la colmatación de las dolinas, favorecida, por otro lado, por el intenso aprovechamiento agrícola de estas formas del modelado kárstico.

Al oeste de Balsares se encuentran dos uvalas. Su presencia en este neokarst está de acuerdo con la tesis de Julián (1974), según la cual se reconoce un origen independiente para cada una de las formas exokársticas, coexistiendo juntas en las distintas etapas evolutivas del karst. Las uvalas se han formado por retroceso normal de las laderas, dando lugar a la coalescencia de dolinas. La uvala situada más al norte presenta un contorno regular, con un borde abrupto y bien definido en su vertiente septentrional, debido a la presencia de una fractura de dirección prácticamente EO. La coalescencia se ha efectuado por el sur, con una dolina cuyo eje presentaba una dirección perpendicular, dando lugar a un fondo en forma triángulo. El fondo plano de la uvala apoya la idea de la colmatación progresiva de las depresiones cerradas. La segunda uvala, de contornos más irregulares, se debe a la conjunción de tres dolinas que presentaban distintas orientaciones. La progresión de la uvala a favor de una fractura norte-sur, ha determinado su posterior apertura.

Junto a las uvalas existen otras formas evolucionadas de depresiones: las dolinas capturadas o abiertas (foto 4.4). Se localizan en los límites de los afloramientos, donde la pendiente es más elevada y favorece la circulación de agua, con el progresivo desmantelamiento de uno de los bordes de la depresión. En la rambla de la Planisa se localiza un ejemplo de dolina capturada que actualmente vierte hacia este cauce, perdiendo los rasgos propios de las depresiones kársticas. Observando esta misma rambla, se ha podido apreciar la existencia de fondos de dolinas, así como restos de antiguos umbrales en sus márgenes. Este cauce, adaptado a una falla de dirección N125E, constituye un ejemplo de valle ciego, aunque la profunda transformación agrícola ha encubierto los rasgos primitivos y dificulta una determinación más concreta.

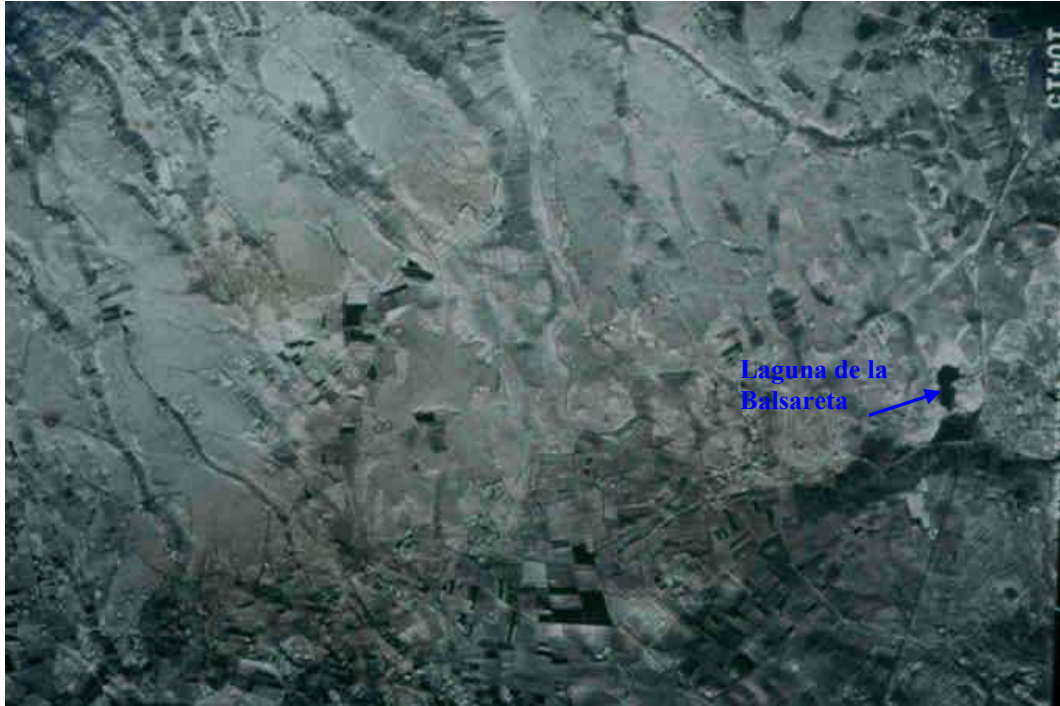


Foto 4.4. Campo de dolinas en el neokarst de El Altet

En la foto 4.5 puede verse la disolución en diaclasas, como inicio de una dolina, en donde la vegetación contribuye a la karstificación



Foto 4.5. Disolución en diaclasas, como inicio de una dolina; la vegetación contribuye a la karstificación

4.3.2. NEOKARST EN LAS CALCARENITAS OOLÍTICAS DEL TIRRENIENSE

En el afloramiento de Tirreniense de la zona del túnel apenas se advierten formas kársticas en las calcarenitas, dado que la anchura del mismo es pequeña; sin embargo más al sur, en Urbanova y Arenas del Sol existen numerosas dolinas y uvalas que están cubiertas de arenas eólicas; son frecuentes las dolinas y uvalas alargadas (foto 4.6), ya que se adaptan a fracturas, siendo las más abundantes las de dirección N70 E (Rodríguez Estrella et al. 2008).



Foto 4.6. Uvala cubierta de vegetación en Arenas del Sol

En la foto 4.7 pueden verse estas formas exokársticas y su relación con las fracturas.



Foto 4.7. Dolinas, uvalas y diaclasas en las calcarenitas del Tirreniense en Arenas de Sol

4.4. FORMAS EÓLICAS

Están situadas en la zona costera y relacionadas con las calcarenitas oolíticas del Tirreniense de la restinga, de manera que en muchas ocasiones son difíciles de distinguir; existe una diferencia, que cuando se da es determinante, y es la estratificación cruzada, propia de las dunas eólicas (foto 4.8).



Foto 4.8. Estratificaciones cruzadas en las dunas fósiles en las proximidades de la boca norte de la DA-II

También son frecuentes en estas dunas la erosión del tipo alveolar o “nido de abejas”, tal como se puede ver en la foto 4.9.



Foto 4.9. Erosión del tipo alveolar o “nido de abejas” en dunas

CAPÍTULO 5

DESALADORA DE ALICANTE I (DA-I)

CAPÍTULO 5

5. DESALADORA DE ALICANTE I (DA-I)

La fecha de arranque de la DA-I fue el 23 de septiembre del 2003; sin embargo, hasta llegar a aquí fue necesario realizar una investigación geológica e hidrogeológica de detalle, basada en geofísica y, sobre todo en sondeos de investigación, bombeos de ensayo, etc.

Así como de la geología e hidrogeología de las obras de captación para la DA-II se tiene un gran conocimiento, ya que hemos participado en el control de las mismas, de la DA-I se tiene un conocimiento menor y sólo se ha interpretado algunos de los escasos informes técnicos.

5.1. OBRAS DE CAPTACIÓN: SONDEOS VERTICALES

La DA-I se abastece de agua procedente de la explotación del acuífero costero de Agua Amarga a través de 33 pozos verticales, cuyas características están resumidas en las tablas 5.1 y 5.2. En el recuento realizado en mayo de 2010, sólo 26 de ellos se encontraban en funcionamiento. Los motivos por los que no todos los pozos se encuentren operativos tienen que ver con el hecho de que su rendimiento sea muy bajo o bien con que su puesta en marcha afecte al rendimiento de pozos adyacentes. También, las reparaciones y cambios de las bombas de impulsión, así como distintas pruebas llevadas a cabo por el personal técnico, causan paradas ocasionales de los pozos de extracción.

Pozo	Caudal (m ³ /h)		Capacidad bomba (m ³ /h)	Prof. pozo m.	Material captado	Fecha Construcción	Intervalo rejilla	Profundidad sellado m.	Ø mm
	inicial	ago-09							
P-1	105.5	85.0	450	55	calcarenita Pleist.-areniscas Plioc.	26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-2	107.8		450	55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-3	123.8		450	50		ago-01	5-42 metros	4	500
P-4*	77.0			55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-5	89.2		450	55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-6	204.9		450					3	500
P-7	265.0	317.9	450	55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-8	377.4	418.0	450	55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-9	109.8		450	52		10-19 mayo 01	5-45 metros	4	500

* Funciona como piezómetro

Tabla 5.1. Resumen de las características de los pozos de captación de agua subterránea P-1 a P-9 de la DA- I

Pozo	Caudal (m3/h)		Capacidad bomba (m3/h)	Prof. pozo m.	Material captado	Fecha Construcción	Intervalo rejilla	Profundidad del sellado m.	Ø mm
	inicial	ago-09							
P-10	349.1	120.0	450	55	calcarenita Pleist.-areniscas Plioc.	26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-11	331.4	418.0	450	55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-12*	118.3			55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-13	347.8	298.0	450	55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-14	307.7	235.0	450	50		26-4-2002 al 5-6-2002			500
P-15	392.2	266.0	450	55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-16	345.5	122.0	150	50		26-4-2002 al 5-6-2002			500
P-17	364.6	98.5	450	55		26-4-2002 al 5-6-2002	12-50 metros	3	500
P-18*	124.0			50					500
P-19	396.9	450.0	450	105	Pleistoceno, Plioceno y Messiniense superior. Calcarenitas, margas y calizas	3-4 de 2004	a partir de 25 metros	4	700
P-20	240.1	125.0	125	105		3-4 de 2004	a partir de 25 metros	4	700
P-21	399.4	506.0	400	105		3-4 de 2004	a partir de 25 metros	4	700
P-22	247.2	170.0	160	105		3-4 de 2004	a partir de 25 metros	4	700
P-23			450			2006			
P-24	142.7		450	150	Messiniense superior. Calizas, margas y calcarenitas	2006	a partir de 65 m. y alternando.	12	700-660
P-25	79.5	116.0	125	150		2006	a partir de 65 m. y alternando.	12	700-660
P-26	207.8	310.0	450	156		2006	a partir de 54 m y alternando.	40	700-660
P-27	404.0	270.0	450	156		2006	a partir de 42 m y alternando.	42	700-660
P-28	337.4	232.0	450	156		2006	a partir de 42 m y alternando.	22	700-660
P-29		302.0	450	156		2006	a partir de 48 m y alternando.	32	700-660
P-30	150.0	130.0	125	150		2006	a partir de 45 m. y alternando.	12	700-660
P-31	193.0	273.0	450	156		2006	a partir de 50 m y alternando.	39	700-660
P-32	186.2	215.0	450	156		2006	a partir de 36 m y alternando.	32	700-660
P-33	160.5		160	156		2006	a partir de 39 m y alternando.	39	700-660
I-3*				150		11-15 diciembre 2000	a partir de 50 m y alternando	50	650

* Funciona como piezómetro

Tabla 5.2. Resumen de las características de los pozos de captación de agua subterránea P-10 a P-33 de la DA- I

El mapa de localización de los pozos aparece en la figura 5.1 y las coordenadas de los mismos en el Anexo 2. La foto 5.1 muestra la alineación paralela al mar de las arquetas de los pozos, mientras que la foto 5.2 ilustra un detalle de los materiales del Tirreniense atravesados por las captaciones.

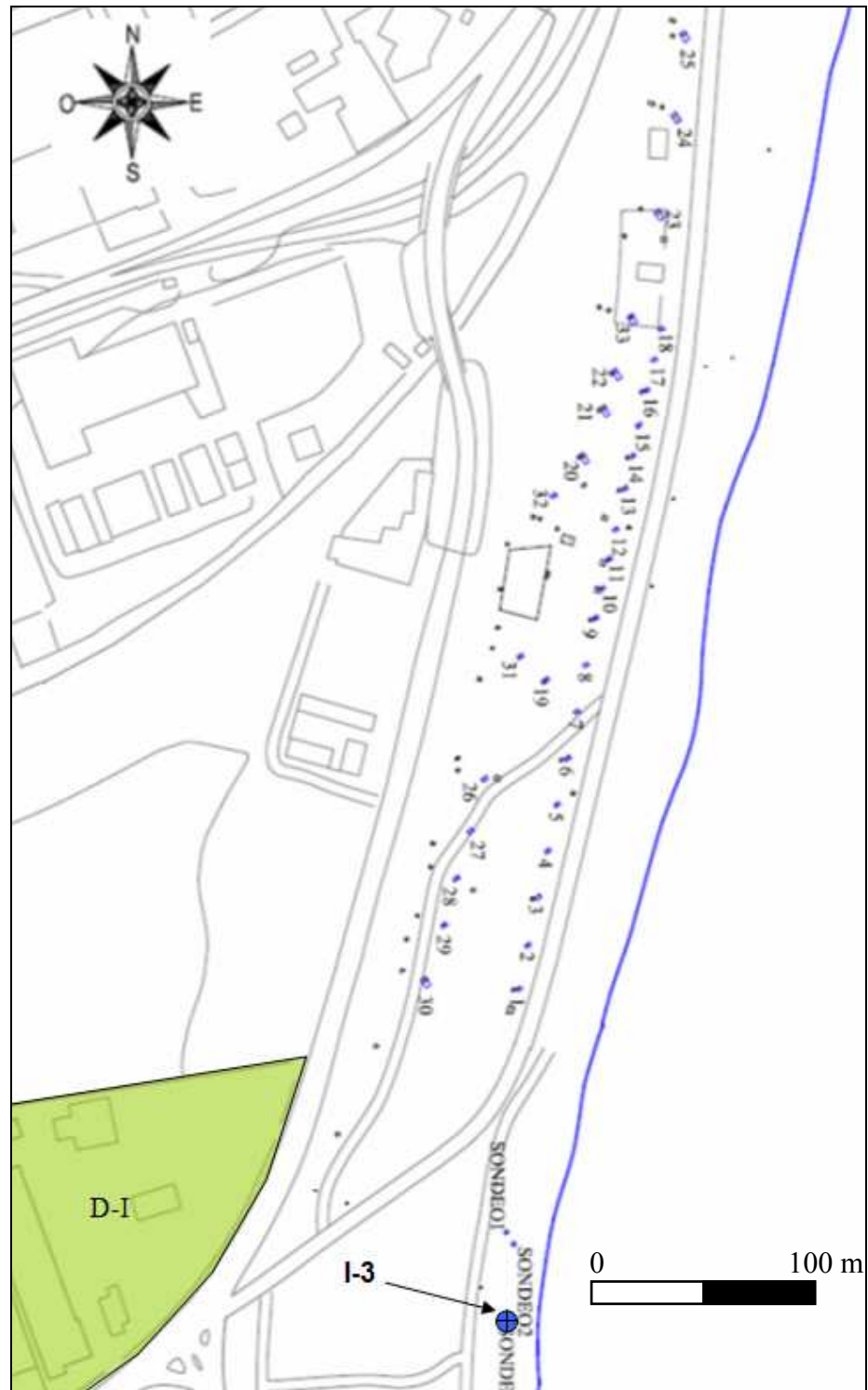


Figura 5.1. Situación de los pozos de la DA-I



Foto 5.1. Alineación paralela a la costa de las arquetas de los pozos de extracción de la DA-I



Foto 5.2. Detalle de las calcarenitas del Tirreniense perforadas por los pozos de extracción de la DA-I (al fondo)

5.2. RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN

En la figura 5.2 se han representado los volúmenes de extracción anuales para el periodo 2004-2009.

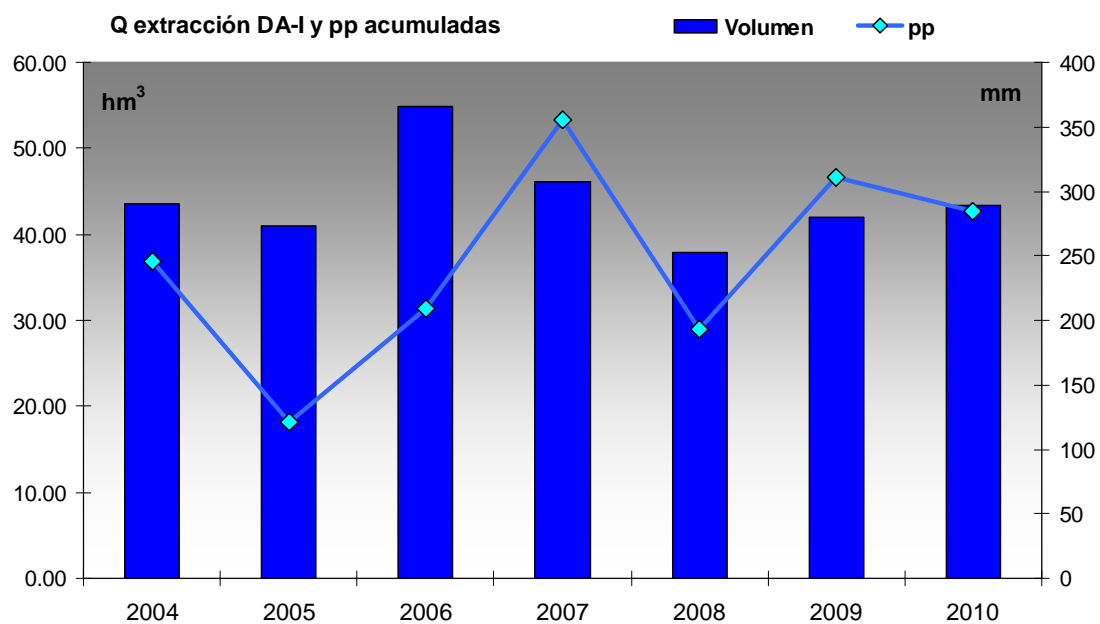


Figura 5.2. Volúmenes de extracción anual de la DA-I y precipitaciones durante el periodo 2004-2009

El valor medio anual se sitúa en torno a 44 hm^3 . Los valores máximo (2006) y mínimo (2008) son de 54 hm^3 y $37,8 \text{ hm}^3$, respectivamente. En referencia a los valores de precipitación anual acumulada se aprecia una correlación entre éstos y los cambios en el régimen de extracción; al aumento de las precipitaciones en los años 2006 y 2007 le sigue una disminución en el régimen de extracción (años 2007 y 2008), mientras que la disminución de las precipitaciones en los años 2005 y 2008 produce un aumento en los caudales de extracción (años 2006 y 2009).

La figura 5.3 muestra los volúmenes de extracción mensuales para el tiempo comprendido entre septiembre de 2008 y diciembre de 2010, periodo durante el cual se ha seguido un control piezométrico y de calidad química en el entorno del saladar de Agua Amarga. Los valores más bajos de extracción corresponden con el periodo de lluvias relativamente abundantes entre septiembre de 2009 y enero de 2010. Desde junio de 2010, el volumen de extracción de la desaladora DA-I se ha estabilizado en torno a $3,76 \text{ hm}^3/\text{mes}$.

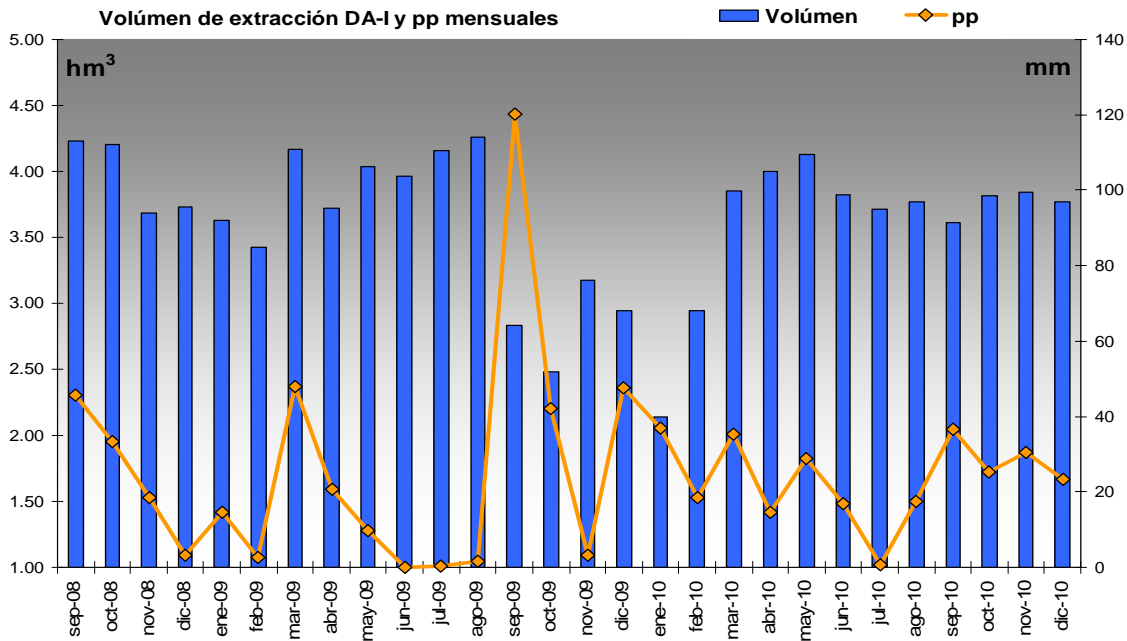


Figura 5.3. Volúmenes de extracción mensual de la DA-I y precipitaciones durante el periodo septiembre de 2008 a diciembre de 2010

Los caudales de extracción de cada pozo durante el periodo 2004-2009 se presentan en la figura 5.4. Las series no se encuentran completas debido a averías en los caudalímetros, abandono temporal de algunos pozos, o desfases en las fechas de construcción de los pozos. Una de las consideraciones a destacar en relación con estos caudales es que existe un descenso progresivo en los volúmenes anuales extraídos por cada pozo. Esto puede deberse a un menor rendimiento de los pozos a causa de las incrustaciones producidas en las rejillas, a la corrosión de las mismas, a la sedimentación de arena en el fondo y/o a la afección ocasionada por el solapamiento con los radios de influencia de otros pozos circundantes. La caída de los

volúmenes de extracción también puede explicarse por la disminución de la demanda durante los años 2007 y 2008.

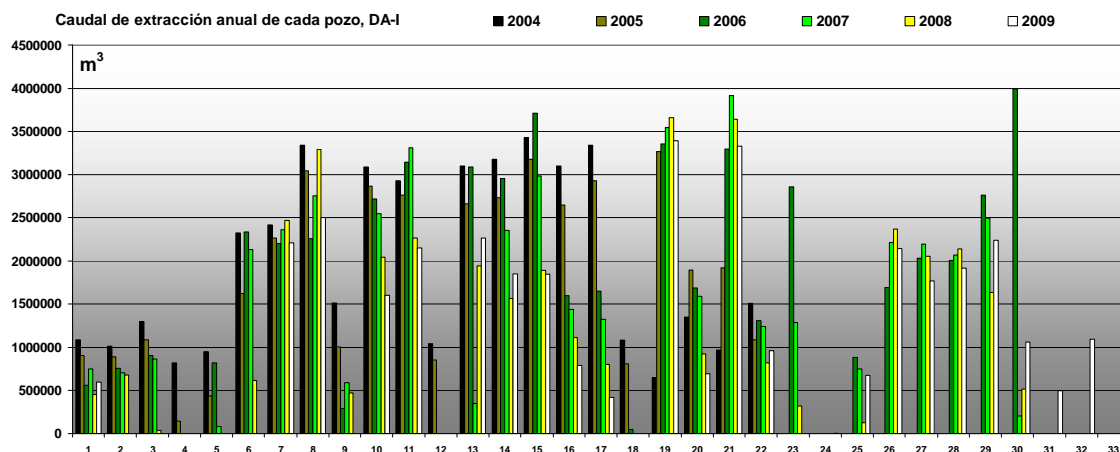


Figura 5.4. Relación de volúmenes de extracción anuales de los pozos de captación de la DA-I, para el periodo 2004 a 2009

5.3. ANÁLISIS SOBRE EL RENDIMIENTO DE LOS POZOS

El caudal específico de un pozo es el cociente entre el caudal de agua bombeado y el descenso del nivel medido dentro del pozo, en l/s/m (Custodio y Llamas, 1983). Es un valor constante cuando se alcanza el régimen permanente y está relacionado con el gasto energético; para un mismo pozo, a menor caudal específico, mayor es la energía invertida para elevar el agua y, por tanto, menor es el rendimiento energético del pozo. Con los datos disponibles de niveles dinámicos, caudales de explotación del primer semestre de 2009 y características técnicas de cada instalación, se han elaborado los gráficos de las figuras 5.5 y 5.6.

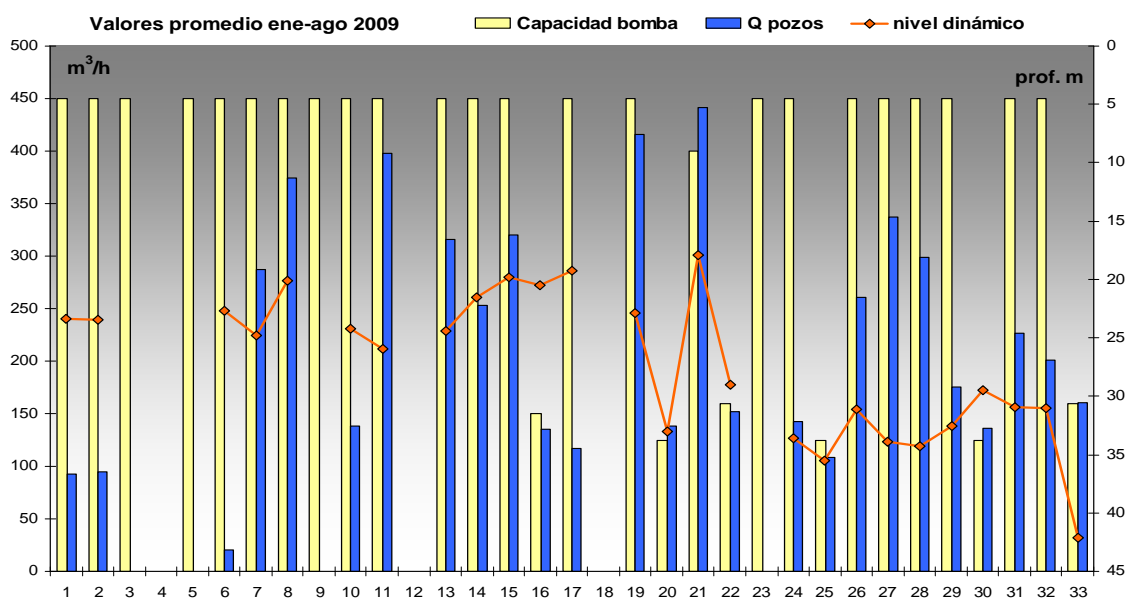


Figura 5.5. Relación entre los caudales extraídos, capacidad de la bomba instalada y profundidad del nivel dinámico de los pozos de captación de agua subterránea de la DA-I. Valores promedio durante el primer semestre de 2009

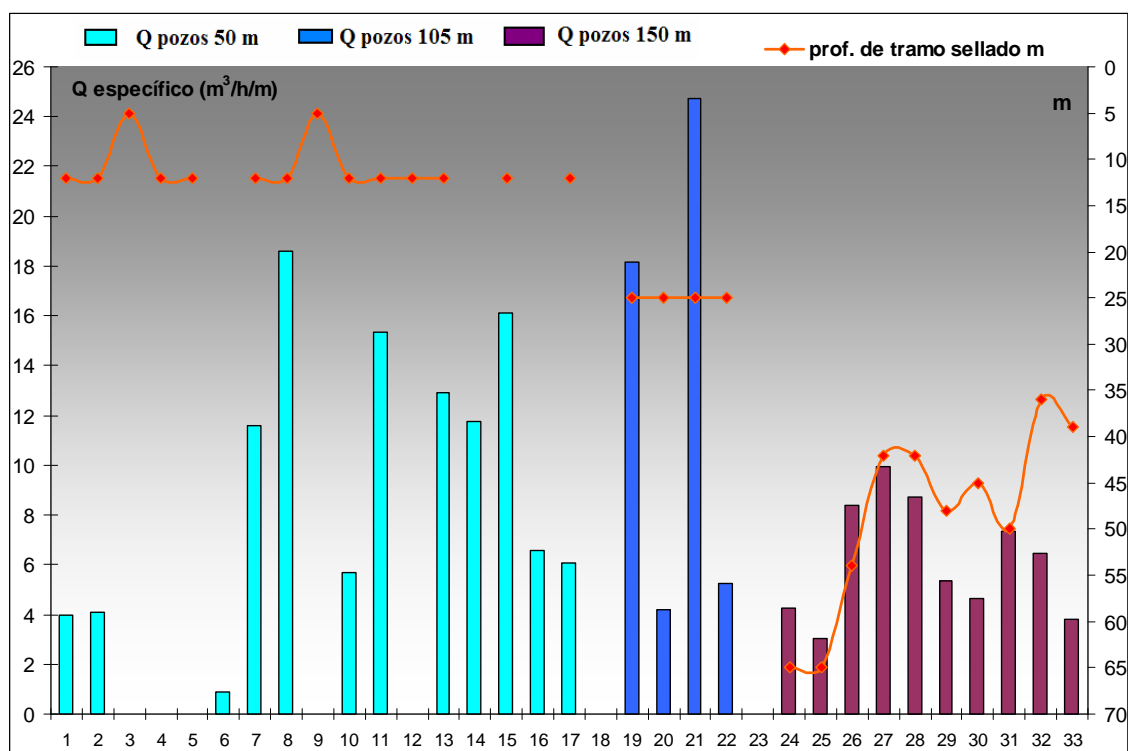


Figura 5.6. Caudales específicos promedio calculados para el primer semestre de 2009. Se ha representado la profundidad del tramo sellado (eje derecho)

De la observación de estas figuras se deduce que los pozos más profundos, que son a su vez aquellos en los que se alcanza mayor profundidad de tramo sellado, son los que menor caudal específico presentan (3-10 m³/h/m). El resto de pozos presenta valores dispares que oscilan entre máximos de 25 y 18 m³/h/m (pozos 21, 8 y 19) y mínimos en torno a 4 m³/h/m (pozos 1, 2 y 20). La productividad del acuífero Messiniense, según estos datos, parece menor que la del acuífero superior del Plioceno y Pleistoceno. La variabilidad en los valores entre pozos con características similares se debe a la naturaleza geológica del medio, con una distribución espacial heterogénea de la litología, y a la presencia de fracturas.

CAPÍTULO 6

DESALADORA DE ALICANTE II (DA-II)

CAPÍTULO 6

6. DESALADORA DE ALICANTE II (DA-II)

En el año 2005 se confeccionó el Proyecto de Ampliación de la Desaladora de la Mancomunidad de los Canales del Taibilla en Alicante, MCT-MMA y U.T.E. (2005). Durante los trabajos de investigación se resolvió la toma de agua mediante captaciones subterráneas, ya que existía una buena conexión hidráulica entre el acuífero y el mar, y los rangos de transmisividad calculados eran suficientes para abastecer la demanda prevista, que se situó de partida en torno a 24 hm³/a de agua producto (1700 l/s en caudal continuo de agua de mar).

En el lugar donde se planificaba realizar las captaciones se encuentra el Saladar de Agua Amarga, que constituye una Zona Húmeda Protegida. Las obras de captación mediante sondeos verticales iban a producir un impacto ambiental sobre la superficie de dicho espacio sensible. La solución planteada fue la de construir un túnel de 1000 m de longitud entre la línea de costa y el saladar, y en su interior realizar hasta 104 perforaciones inclinadas que actuarían como drenes. En el fondo de las cántaras de almacenamiento, situadas junto a las bocas de entrada y salida del túnel, se perforaron 8 sondeos inclinados más, 4 en cada una de ellas. Por último, se realizaron 11 Perforaciones Horizontales Dirigidos (PHD), bajo el fondo marino, de 350 a 500 m de longitud (Rodríguez Estrella et al., 2008).

A primeros del año 2008 se dieron por terminadas las obras de captación de agua de mar para abastecer a la Desaladora DA-II, si bien la explotación global no se inició hasta el 4 de Octubre del 2008 (el 31-7-08 ya se pusieron en marcha los sondeos del túnel y los tres neodrenes de la boca de entrada).

6.1. OBRAS DE CAPTACIÓN

En la figura 6.1 se puede ver un esquema que representa una sección, paralela a costa y vista desde el mar, de las captaciones en el túnel y las bocas de entrada y salida.

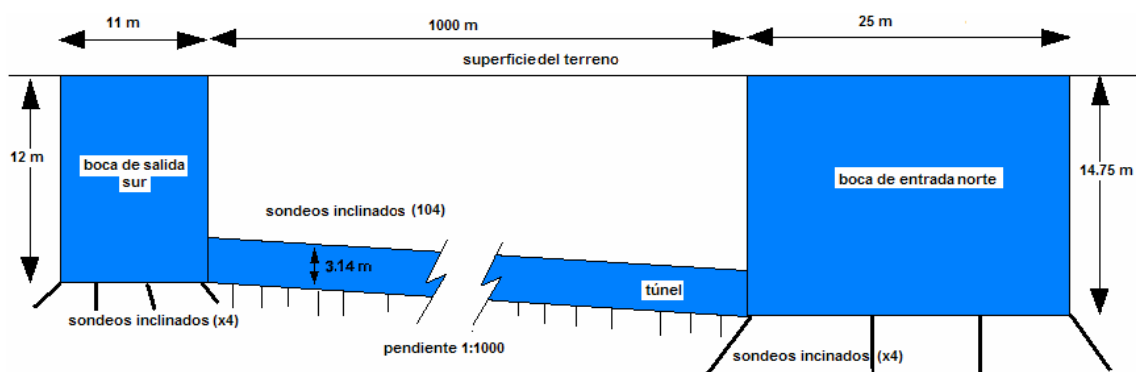


Figura 6.1. Sección esquemática sur (izquierda)-norte (derecha) de las obras de captación de la DA-II (no se muestran los PHD)

6.1.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LAS BOCAS DE ENTRADA Y DE SALIDA

La boca de entrada o cántara de almacenamiento, situada al norte, está constituida por un anillo de hormigón de 1 m de espesor, con diámetro interior de 25 m. La base del mismo tiene una cota absoluta de -28 m; sin embargo, la bancada de apoyo (fondo real de la boca de entrada) se sitúa a una cota de -14,75 m (figura 6.1).

La boca de salida, situada al sur, está constituida igualmente por un anillo de hormigón de 1 m de espesor, con diámetro interior de 11 m. La base del mismo tiene una cota absoluta de -19,8 m, mientras que la bancada de apoyo se sitúa a -12 m (fotos 6.1a-b).

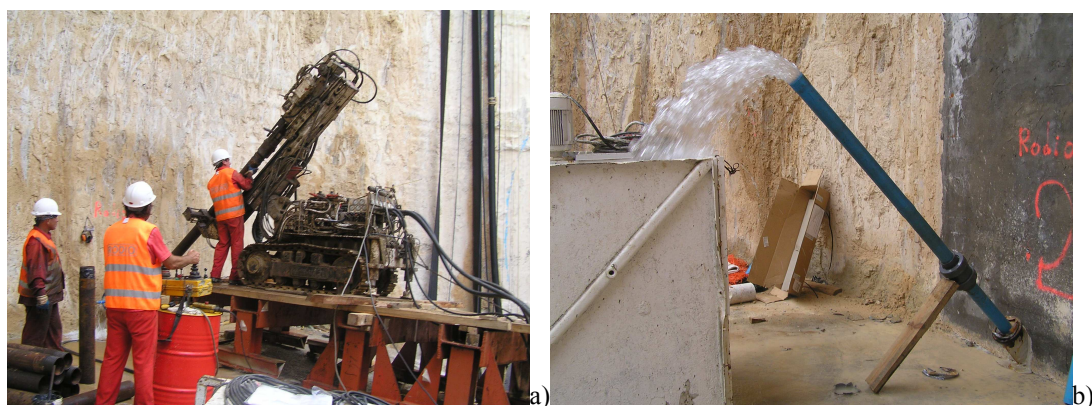


Fotos 6.1. a): boca de entrada, b): boca de salida y conexión con el túnel

6.1.2. SONDEOS INCLINADOS EN LAS BOCAS DE ENTRADA Y SALIDA AL TÚNEL

En el fondo de las paredes de las bocas de entrada y salida del túnel, se perforaron 8 sondeos inclinados (4 en cada boca), con una distancia entre ellos de 9,4 m. Se trata de un sondeo de 20,5 m de longitud y 133 mm de diámetro de perforación y 7 sondeos de

25 m de longitud y 150 mm de diámetro. La tubería-filtro instalada es del tipo Jhonson, de 80 mm de diámetro para el primer sondeo y 115 mm para los 7 restantes. El ángulo de inclinación es de 30° en relación con la vertical. Los caudales surgentes de cada pozo se estimaron en 16 l/s para los sondeos de la boca de entrada y 30 l/s para los de la boca de salida. Las fotos 6.2a y b muestran un detalle de la ejecución de las obras de construcción de los pozos así como la surgencia de agua en uno de los pozos recién perforados.



Fotos 6.2. a): Detalle de la construcción de un pozo inclinado en la base de la boca de entrada y
b): Surgencia de agua en una de las captaciones recién finalizadas

6.1.3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DEL TÚNEL

El túnel se ubica entre la línea de costa y el saladar, separado una distancia de 50 m de la primera. Tiene 1000 m de longitud, un diámetro interior de 3,14 m y exterior de 3,64 m (las dovelas tienen un espesor de 0,5 m), y una pendiente descendiente de 1:1000, desde la boca de salida a la de entrada. La base del mismo está a una cota de -12,5 m y en su interior se han perforado sondeos inclinados. La capacidad de almacenamiento del túnel es de 7740 m³. El conjunto túnel más cántaras de almacenamiento de entrada y salida proporcionan un volumen de almacenamiento total de 10600 m³. En las fotos 6.3a-c se muestran detalles de las obras de construcción del túnel y las cántaras de entrada y salida.





Fotos 6.3. a): Técnicos junto al almacén de dovelas del túnel. b): Tren de extracción de tierras perforadas por la tuneladora, c): Acabado del interior del túnel

6.1.4. POZOS INCLINADOS EN EL INTERIOR DEL TÚNEL

Se realizaron 104 sondeos inclinados con un diámetro de perforación de 160 mm y un ángulo de entre 30° y 60° con la horizontal. La longitud de los mismos es de 25,5 m y están distanciados entre sí 9,6 m. Las tuberías instaladas tienen un diámetro de 130 mm y una longitud de 1 m, y llevan adosado un filtro microporoso en los 18 m finales (los 7 m del inicio no llevan filtro). Las fotos 6.4a-c muestran detalles de los sondeos inclinados del túnel.



Fotos 6.4. a): Revestimiento microporoso de las tuberías, b): Máquina de perforación en el interior del túnel, c) Surgencia de agua de mar en uno de los sondeos del interior del túnel

6.1.5. PERFORACIONES HORIZONTALES DIRIGIDAS

Con objeto de aumentar los volúmenes de extracción para atender la demanda de la desaladora DA-II, se realizaron 11 Perforaciones Horizontales Dirigidas (PHD) que se internan bajo el mar, fuera del dominio del Saladar: tres de ellas junto a la boca de entrada y ocho junto a la boca de salida. La longitud de estas perforaciones está comprendida entre 350 y 500 m. Las fotos 6.5a-c muestran detalles de las obras de ejecución de las PHD.



Fotos 6.5. a): Ensayo de bombeo en una PHD, b y c): Dos máquinas de PHD trabajando al mismo tiempo

El punto de partida de las PHD se localiza a 65 m de la línea de costa, para la boca de entrada, y a 80 m para la boca de salida. Los neodrenes están separados entre sí 3 m al principio, y se abren en abanico conforme la perforación se adentra en el subsuelo por debajo del mar, hasta acabar con una separación en el extremo de unos 20 m. En los primeros 150 m se adopta un perfil profundo en sifón, en previsión de poder instalar bombas sumergibles si fuera necesario, continuando el trazado de la perforación a 4-5 m del fondo marino rocoso.

Denominac. Neodren	Fecha de realización	Longitud (m)	Caudal inicial (l/s)	Caudal final (l/s)	Caudal recom. (l/s)
S1-D1	20-23/3/07	337	78	98	69
S2-D3	10-14/4/07	468	88	102	86
S3-D2	16-19/4/07	491	64	139	109
S1-D4	12-15/2/08	454	125	136	120
S2-D8	26-29/2/08	474	100	135	125
S3-D3	1-4/4/08	468	113	142	125
S4-D7	15-18/4/08	451	101	141	120
S5-D2	7-10/5/08	461	89	120	120
S6-D6	17-20/6/08	454	125	129	120
S7-D1	26-29/6/08	473	121	122	120
S8-D5	8-11/7/08	444	128	120	115

Tabla 6.1. Características de los neodrenes de la DA-II

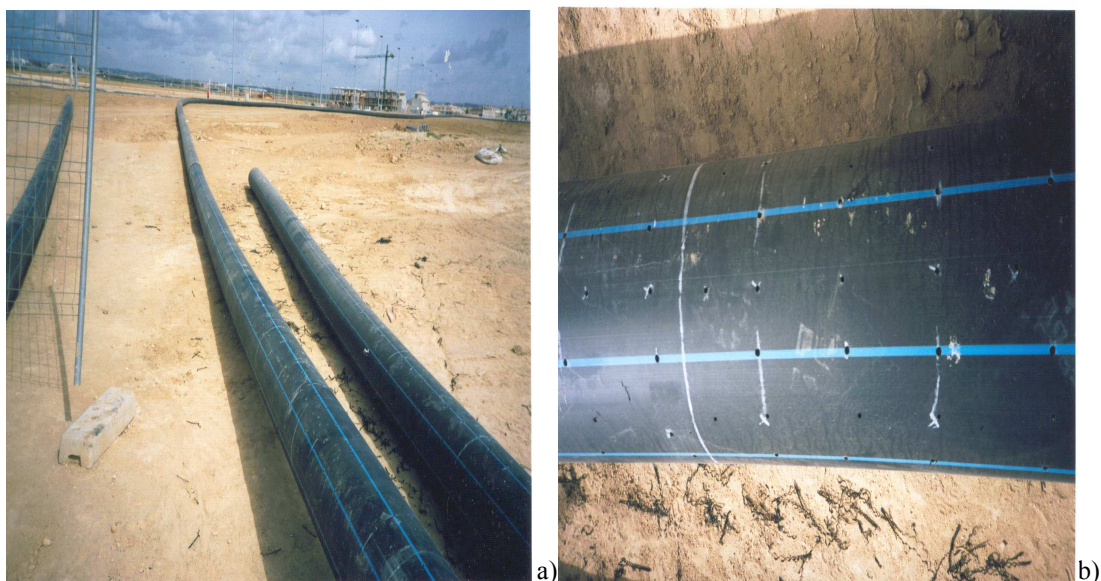
Las características de los neodrenes, longitud y caudal, se muestran en la tabla 6.1. Como síntesis de la misma se puede establecer que:

- Las longitudes están comprendidas entre 337 m, en el S1-D1 y 491 m, en el S3-D2,
- Los caudales van desde 98 l/s, en el S1-D1 a 142 l/s, en el S2-D3,
- Cuanto más largos son los neodrenes, mayor caudal tienen, ya que atraviesan mayores fracturas verticales,
- Los neodrenes de la boca de salida son más productivos que los de la boca de entrada. Además de ser más largos, son más profundos y por tanto captan todos ellos el nivel inferior de calcarenitas y conglomerados del Tirreniense, C_1 , que está más compactado y fracturado que el superior, C_2 .

Otras características constructivas comunes a los neodrenes, son las siguientes:

- Avance: Rotación dirigida con lodos,
- Diámetro piloto: 210 mm,
- Diámetro de ensanche: 650 mm,
- Material de la tubería: Polietileno,
- Diámetro de la tubería: 450 mm de exterior y 386,6 mm de interior,
- Longitud de los tubos: 150 m,
- Cementación anular de los extremos: Cemento Pórtland resistente a sulfuros y agua de mar.

Los orificios de las tuberías que actúan como filtro son redondeados (de hasta 1 cm de diámetro) en vez de alargados; de esta manera ofrecen mayor resistencia a la rotura cuando las tuberías son traccionadas para ser introducidas. Las fotos 6.6a-b muestran detalles de las tuberías.



Fotos 6.6. a): Tuberías extendidas en tierra. b): Detalle de los orificios circulares

Las ventajas de los sistemas de captación mediante PHD, para las desaladoras de Alicante y San Javier (Murcia), han sido puestas de manifiesto por Rodríguez Estrella (2007). En relación con ellas cabe destacar:

- Los acuíferos costeros calcareníticos del Tirreniense ubicados en el litoral entre Murcia y Alicante, presentan sistemas de fracturas karstificadas subverticales. Esto permite que las PHD intercepten gran número de ellas y que por tanto puedan captar mayores volúmenes de agua, Rodríguez Estrella (2005).
- Existe mayor garantía de explotación a lo largo del tiempo, puesto que la roca permeable del fondo marino está permanentemente saturada y en contacto directo con el mar.
- Se pueden extraer elevados caudales (superiores a los 100/s por dren) de forma constante.
- Este sistema está indicado también en acuíferos poco permeables (alternancia de arenas y gravas, por ejemplo), pues si se utilizaran perforaciones verticales, se necesitarían un gran número de ellas para obtener un volumen discreto.
- El agua bombeada no tiene turbidez (no está en contacto con las olas).
- Se obtiene un agua con calidad química y temperatura constantes.
- Ausencia de impactos medioambientales en el régimen hídrico del acuífero y en el hábitat marino y terrestre de las zonas litorales ambientalmente protegidas.

- Si, como es recomendable, la extracción se realiza a partir de al menos 50 m de la costa (para ello la tubería en este tramo irá ciega y cementada), se evita la formación de conoides depresivos de la piezometría del acuífero, impidiendo la afección a los pozos vecinos del continente.
- A consecuencia de lo anterior, no se producen subsidencias ni colapsos en la playa, especialmente si la roca permeable es detrítica no consolidada, ni agrietamientos en las urbanizaciones costeras.
- Es posible instalar una batería de muchos drenes en una parcela del continente de reducida superficie, ya que una vez internados en el mar pueden adoptar en conjunto una disposición divergente, a manera de abanico, como en la planta desaladora del Nuevo Canal de Cartagena, Pulido et al. (2003).
- Es el único sistema que puede captar acuíferos exclusivamente marinos.

Presenta un inconveniente, de momento, y es que, si se trata de acuíferos detríticos, los finos obturan en parte los orificios de paso del agua con el tiempo (tanto más si se extraen grandes caudales), con las correspondientes bajadas en la productividad y las averías en las bombas. Este problema se puede paliar si se colocan tubos microporosos de elevado coste.

6.2. RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN

De acuerdo con lo dicho anteriormente, el agua del mar procede de los 11 neodrenes (PHD), de los 104 sondeos del interior del túnel y de los 8 ubicados en la base de las cántaras. El agua, almacenada en el túnel y en las cántaras, se eleva desde la cántara de entrada mediante bombas sumergidas. Los volúmenes bombeados por meses, desde el inicio de la explotación en sep-08 hasta diciembre de 2010, así como los días de parada, pueden verse en la figura 6.2 y en la tabla 6.2.

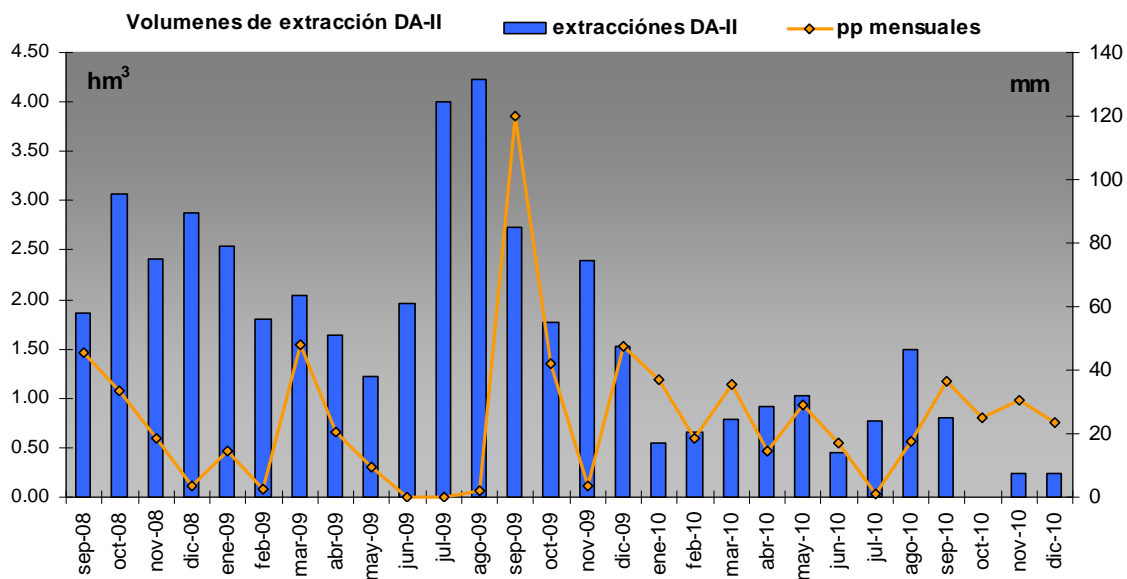


Figura 6.2. Volúmenes mensuales de agua de mar extraídos para la DA-II y precipitaciones mensuales durante el periodo septiembre de 2008/diciembre de 2010

Fecha	Volumen mensual m³	días de parada
sep-08	1859106	0
oct-08	3077161	0
nov-08	2403154	0
dic-08	2874375	13
ene-09	2533842	14
feb-09	1798343	3
mar-09	2037667	2
abr-09	1633596	3
may-09	1220161	3
jun-09	1953295	0
jul-09	3993931	0
ago-09	4225964	0
sep-09	2730883	1
oct-09	1773695	1
nov-09	2394667	2
dic-09	1530609	0
ene-10	548981	8
feb-10	660500	13
mar-10	793751	3
abr-10	915425	0
may-10	1025405	3
jun-10	450013	6
jul-10	764588	1
ago-10	1499900	0
sep-10	796707	2
oct-10	0	31
nov-10	241899	12
dic-10	236301	21
TOTAL	45973919	

Tabla 6.2. Volúmenes mensuales de agua de mar bombeados en la DA-II y días de parada, para el periodo septiembre de 2008/diciembre de 2010

El volumen total bombeado, en el periodo considerado, es de 45973919 m³ (46,0 hm³). Los meses de mayor extracción suelen coincidir con periodos de escasas lluvias (julio y agosto de 2009). Desde enero de 2010 se ha producido una disminución en los volúmenes de extracción; en concreto, en el periodo agosto-diciembre de 2010, se han producido los valores más bajos desde la puesta en marcha de la desaladora DA-II; en los meses de noviembre y diciembre de 2010, se produjeron 12 y 21 días de parada, respectivamente, con un cese total de las instalaciones durante el mes de octubre.

Aprovechando que durante el mes de Enero del 2009 no se bombeaba agua de los neodrenes de las PHD, debido a la menor demanda, el día 28-1-10 se aforó el agua del túnel, deduciéndose que su caudal era de 2000 m³/h (555 l/s equivalente a 1440000 m³/mes). En tanto que este caudal no cuadra con los volúmenes totales obtenidos en la planta durante algunos meses, puede deducirse que esta cifra debe corresponder a un caudal máximo, pues cuando funcionan los neodrenes el peso de la columna de agua en las cántaras es tal que reduce la salida de agua en los sondeos inclinados del túnel, por estar situados en la parte baja del sistema de captación. El aforo se hizo de la siguiente manera: una vez el agua del túnel había llenado la cántara se fueron bombeando de la misma distintos caudales hasta llegar al que consiguió estabilizar el nivel de la cántara (el agua que entraba a ésta por los sondeos del túnel era la misma que salía bombeada). El caudal obtenido en este ensayo es similar al que se aforó en mayo de 2008, con un valor de 638 l/s.

CAPÍTULO 7

HIDROGEOLOGÍA: ACUÍFERO COSTERO DE AGUA AMARGA

CAPÍTULO 7

7. HIDROGEOLOGÍA: ACUÍFERO COSTERO DE AGUA AMARGA

7.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

No existe bibliografía hidrogeológica referida concretamente al acuífero costero de Agua Amarga. Los antecedentes se refieren a trabajos que engloban un área de estudio más amplia, concretamente El Campo de Elche. Entre estas investigaciones se encuentran algunas publicaciones del IGME (IGME-DPA, 1994; IGME, 1985) y una de Rodríguez Estrella et al. (1992).

Para la elaboración de la Tesis se han utilizado datos, hasta ahora inéditos, existentes en los estudios de investigación para la construcción de las desaladoras DA-I y DA-II, que la MCT ha puesto a disposición de la UPCT. Esta información consta de un total de 7 informes internos, que aparecen referenciados en la bibliografía. Por otra parte, la UPCT, a petición de la MCT, ha realizado hasta 5 informes hidrogeológicos (2008, 2009, 2010a, 2010b y 2011) en los que ha participado el autor de esta tesis, que lógicamente han sido considerados en la redacción de la misma.

7.2. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL: CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO DEL CAMPO DE ELCHE

Según el mapa hidrogeológico 1:200000 de Elche, IGME (1985), la zona de estudio está relacionada hidrogeológicamente con la Unidad de las Vegas Media y Baja del Segura (código 07-24) a través del acuífero Cuaternario del Campo de Elche. A nivel administrativo pertenece a la Cuenca del Júcar, en concreto a la Masa de Agua ‘Bajo Vinalopó’ (código 080-79) del Sistema de Explotación Vinalopó-Alacanti (código 9). Este sistema comprende las cuencas propias de los ríos Monnegre, Vinalopó y Rambla de Rambuchar, y las subcuencas litorales comprendidas entre el límite norte del término municipal de El Campello y la divisoria con la cuenca hidrográfica del Segura. Los acuíferos costeros ubicados en esta última subdivisión, están considerados como “acuíferos de interés local”, dentro de los cuales se encuentra el acuífero costero del Saladar de Agua Amarga (figura 7.1). En las figuras 7.1 y 7.2 se muestran los mapas de las Masas de Agua subterránea y el mapa de Sistemas de

Explotación y Unidades Hidrogeológicas, respectivamente. La información se ha obtenido de la web: www.chj.es.



Figura 7.1. Masas de Agua Subterránea en la Cuenca del Júcar

El río Vinalopó es uno de los que cuenta con menos recursos de toda la cuenca del Júcar, aproximadamente 73 hm^3 . Por el contrario, la demanda global es alta, casi $282 \text{ hm}^3/\text{año}$ (datos de 2005, www.chj.es). Aguas abajo de la ciudad de Elche, el río desaparece en su propio cono aluvial por lo que, superficialmente, no llega a desembocar en el mar. En épocas de avenidas se producen inundaciones que afectan a edificaciones y zonas agrícolas de la parte más baja del río, ya en el paraje natural de Salinas de Santa Pola. La delimitación de la cuenca superficial afluyente sobre esta llanura aluvial es difusa. Existe una conexión entre la cuenca del bajo Vinalopó y la del Segura; esta última descargaba aguas en torno a la Sierra del Molar, al sur de las salinas de Santa Pola. En superficie esta conexión quedó desvinculada debido a los aportes y a la colmatación durante el Cuaternario, IGME (1985).



Foto 7.1. Cauce de la Rambla de Agua Amarga atravesando los materiales del Messiniense de la Sierra del Colmenar

Según Rodríguez Estrella et al. (1992), el acuífero detrítico cuaternario del Campo de Elche (figura 7.3) presenta una superficie aproximada de 500 km² y se encuentra delimitado:

- Al Norte, por los relieves terciarios de las Sierra del Colmenar y Sierra Gorda, si bien existe una conexión hidrogeológica con ellas en ciertos sectores, como se verá en esta tesis,

- Al Este, por el Mar Mediterráneo,

- Al Oeste, se deben levantar los materiales impermeables, ya que la distancia que existe entre ellos (del Terciario, al Norte, y del Permo-Trias, al Sur), es relativamente pequeña,

- Al Sur, por una línea de dirección E-O (línea discontinua de la figura 7.3), situada al norte del anticlinal que une las Sierras de Callosa del Segura y del Molar. El límite en superficie no está bien definido, pues no existe una diferenciación litológica entre el acuífero de la Vega Baja del Segura y el del Campo de Elche. Sin embargo se presupone que la piezometría está condicionada en profundidad por dicho anticlinal (su eje pasaría por el pueblo de Dolores), que origina la existencia de un umbral entre ambos acuíferos detríticos. El desplazamiento de dicho umbral respecto del eje se explicaría por la existencia de pequeños afloramientos impermeables de filitas permotriásicas al norte de la Sierra de Callosa.

Se trata de un acuífero multicapa, donde alternan niveles arcillosos impermeables con otros permeables constituidos fundamentalmente por niveles de gravas y arenas. Existe un primer acuífero denominado Acuífero Cuaternario Superficial que suele encontrarse seco en la parte septentrional, por razones topográficas. Está constituido por un paquete de limos con lentejones de gravas de espesor comprendido entre 10 y 20 m y de malas características hidrogeológicas. La litología está parcialmente sustituida en su techo por caliches que afloran al S de Torrellano y en El Altet, con un espesor máximo de 2 m. En este caliche se ha desarrollado un neokarts (figura 7.4). Bajo un paquete arcilloso de 10 a 25 m, de espesor aparecen unas gravas de 5 a 10 m de potencia con un contenido variable en arena y arcilla; a este segundo nivel permeable se le denomina Acuífero Cuaternario Profundo Superior, el cual tiene su base impermeable en un

tramo arcilloso de 40 m de espesor. Hacia una profundidad de 70 m se encuentra el techo de un paquete de gravas, con más o menos contenido en arenas y arcillas, de un espesor de 20 m; a este acuífero se le denomina Acuífero Cuaternario Profundo Inferior, que tiene por impermeable de base otro nivel arcilloso. Este esquema hidrogeológico guarda una cierta similitud con el de las Vegas Medias y Baja del Segura.

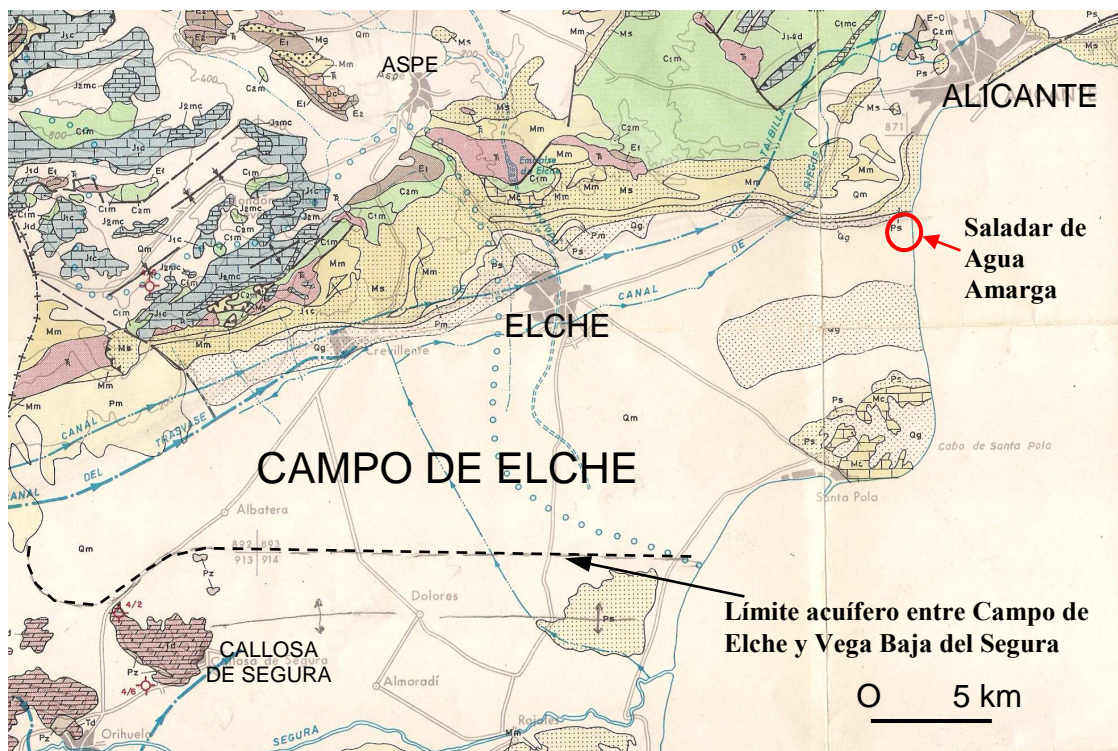


Figura 7.3. Mapa hidrogeológico del Campo de Elche.(Modificado de IGME, 1985)

El acuífero Cuaternario Superficial se encuentra en estado libre, con una profundidad del agua entre 1 y 20 m. Los acuíferos profundos se encuentran confinados y tienen una cota piezométrica superior al superficial, siendo la más alta la del acuífero Cuaternario Profundo Inferior. Cada capa acuífera presenta una piezometría situada 2 m por encima de la correspondiente al acuífero inmediato superior. El flujo subterráneo en el acuífero Cuaternario Superficial se dirige hacia el Mar Mediterráneo (figura 7.5), con una dirección preferencial de NO-SE, lo que indica una alimentación proveniente de las sierras del norte de Elche, a las que se suman las entradas que originan los excedentes de riego y desde el aluvial del Vinalopó. Al Sur, en la sierra del Molar, se observa cierta alimentación desde ésta hacia el Cuaternario del Campo de Elche en dirección a las Lagunas del Hondo y Bras del Port.

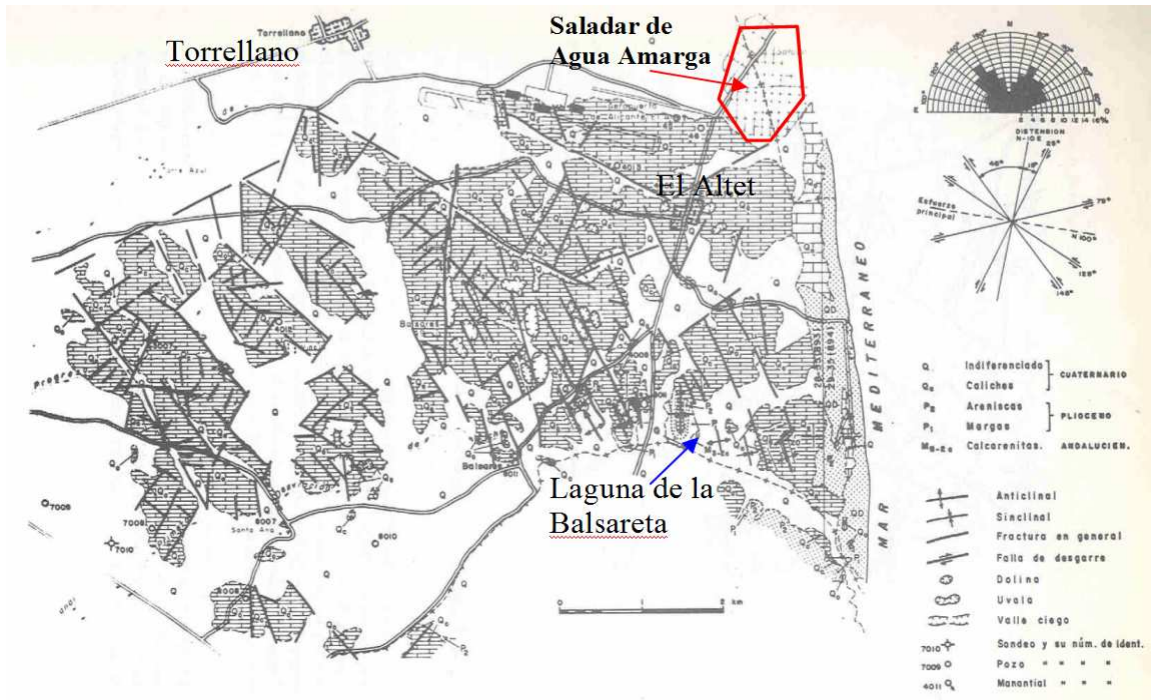


Figura 7.4. Neokarst cuaternario en el Altet (Rodríguez Estrella et al., 1992)

Por otro lado, al SO de la población de Elche, la dirección de flujo varía a NE-SO, ya que la laguna del Hondo representa un drenaje natural del acuífero. Hasta hace algún tiempo, antes de que se construyeran azarbes y canales de drenaje, el nivel de agua alcanzado en la laguna originaba niveles piezométricos someros (a menos de 2 m de profundidad) en la zona situada al NE de la misma, ocasionando asfixia radicular en las plantas.

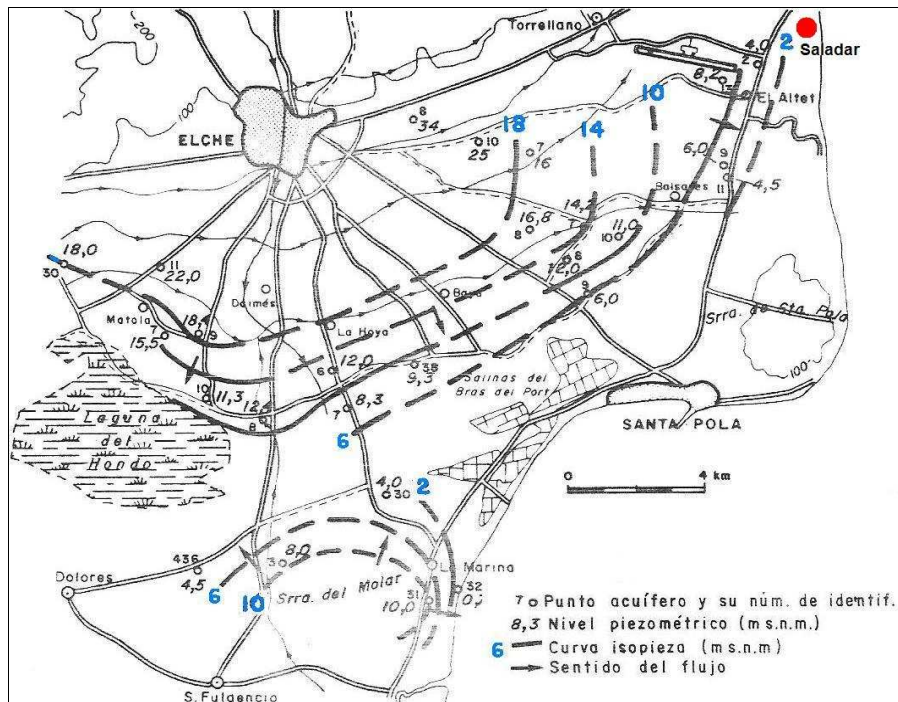


Figura 7.5. Isopiezas del acuífero del Campo de Elche correspondientes a Febrero del 1986 (Rodríguez Estrella et al., 1992)

Por tanto existe una línea de drenaje, de forma convexa hacia el sur, en la que se encontrarían: la laguna del Hondo en el Oeste (foto 7.2), la de Bras del Port al Sur (figura 7.6) y de la Balsareta al Noreste (foto 7.3 y figura 7.7). La laguna de Balsareta, que se sitúa próxima a la zona de estudio (se corresponde con el punto de agua 40011 de la figura 7.6), resulta ser la salida natural del Acuífero Cuaternario Superficial (neokarst de caliche).



Foto 7.2. Laguna del Hondo

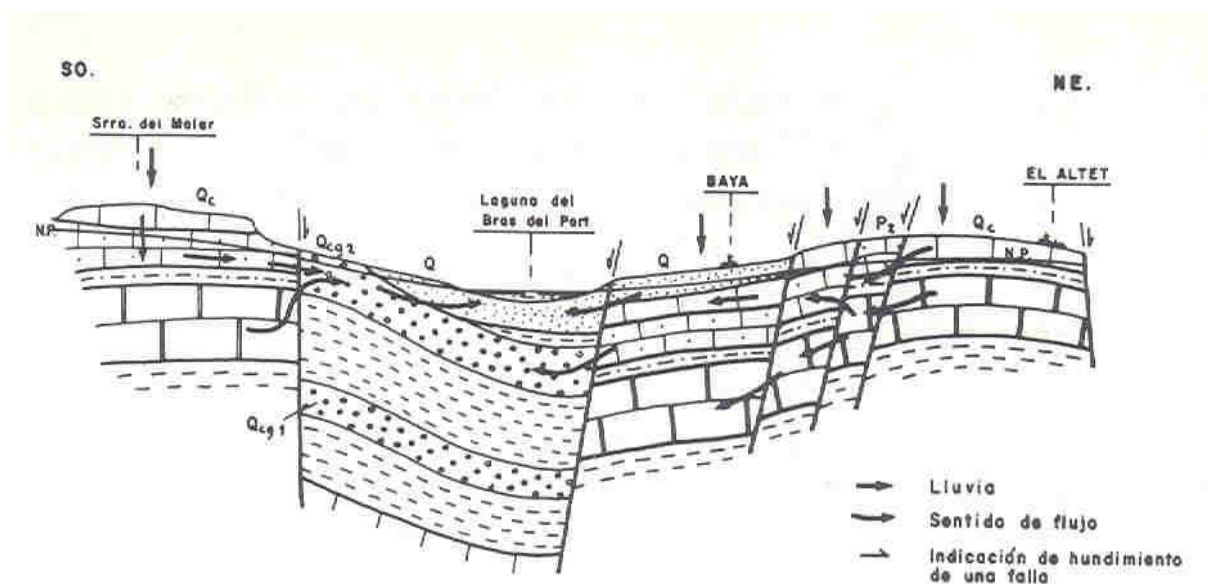


Figura 7.6. Esquema hidrogeológico de la laguna de Bras del Port (Rodríguez Estrella et al., 1992)



Foto 7.3. Laguna de Balsareta

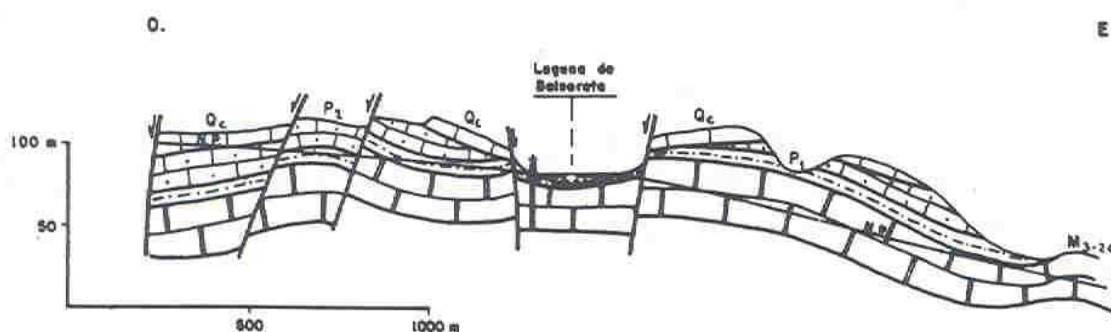


Figura 7.7. Esquema hidrogeológico de la Laguna de Balsareta (Rodríguez Estrella et al., 1992)

El gradiente hidráulico en el Campo de Elche está comprendido entre el 2 y el 4 por mil, llegando al 11 por mil en las inmediaciones de la sierra de Molar.

A nivel hidroquímico, las aguas del Campo de Elche son de mala calidad, con salinidades comprendidas entre 3800 y 6000 mg/l, y pertenecen a facies cloruradas sódicas o mixtas. En la zona de caliche la salinidad del agua (3917 a 5309 mg/l) es algo inferior a la de la zona situada al O del Campo de Elche (salinidad entre 4830 y 6051 mg/l).

7.3. ROCAS PERMEABLES E IMPERMEABLES. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

El acuífero costero de Agua Amarga es un acuífero multicapa que se puede dividir en dos niveles: uno superior de carácter libre-semiconfinado, formado por el conjunto Cuaternario (capas 1, 2 y 3) y el Plioceno superior (capa 4), y otro inferior confinado

constituido por el Messiniense superior (capa 6). En la tabla 7.1 se resume las características hidrogeológicas de las capas que forman el acuífero. Los valores de los parámetros hidráulicos, que están recogidos en los informes internos de la MCT-UPCT (2008 a 2011), se obtuvieron a partir de ensayos de bombeo y de permeabilidad realizados durante las etapas de investigación.

Nº capa	Litología	Edad	Naturaleza	Espesor	Parámetros
1	Fango y arenas finas con sal y yeso	Holoceno	Acuitardo; libre	0,6-2,0 m	K (m/d): 8,640-0,075
2	Calcarenitas oolíticas, dunas de arena y limo, y areniscas calcáreas	Tirreniense	Acuífero; libre	10-60 m	K (m/d):16-150 T (m ² /d):800-5000 n _e : 0,18
3	Gravas, arenas y limos continentales con caliches (Formación Sucina)	Plioceno-Pleistoceno	Acuitardo, semiconfinado	10-60 m	K (m/d): 0,800-0,003
4	Areniscas calcáreas	Plioceno superior	Acuífero; semiconfinado	20-70 m	T (m ² /d): 500-9000
5	Margas y limos	Plioceno inferior	Acuitardo	20-50 m	K (m/d): 10 ⁻⁵
6	Margocalizas, calizas y areniscas	Messiniense superior	Acuífero confinado	75-120 m	T (m ² /d): 800-1.400
7	Margas	Messiniense inferior	Acuicludo	100-200 m	K (m/d): 10 ⁻⁵

Tabla 7.1. Características hidrogeológicas de las capas que forman el acuífero costero de Agua Amarga.
K: conductividad hidráulica, T: transmisividad, n_e: porosidad eficaz

Respecto al acuífero superior_cabe destacar que:

- La capa 1 está constituida por los terrenos fangosos salinos superficiales donde se desarrolló la industria salinera.
- El cambio lateral de facies entre la capa 3, que se extiende hacia el continente, y la 2, que se adentra al menos 600 metros bajo el mar, se produce aproximadamente por el centro del saladar (según sondeos).
- Por otro lado, la capa 4, sobre la que se asientan las demás, es la que presenta mayor extensión, por su gran continuidad.
- La base impermeable, capa 5, está constituida por las margas y limos del Plioceno inferior.
- Los espesores aumentan de norte a sur debido al acuñamiento, por lo que el acuífero es más transmisivo hacia el sur.

El conjunto de las capas permeables se encuentra conectado debido a la heterogeneidad litológica (cambios de facies), tanto laterales como en profundidad y a variaciones de espesor. El acuífero presenta por tanto un carácter alternante entre libre y semiconfinado. Además, la presencia de fracturas contribuye a la conexión vertical entre los

distintos niveles y a la circulación del agua por conductos preferenciales, cuando se trata de rocas carbonatadas (capas 2 y 4).

El acuífero inferior está constituido por las areniscas, calizas y margocalizas del Messiniense superior, capa 6. El sustrato impermeable lo constituyen las margas del Messiniense inferior, capa 7, con un espesor (superior a los 100 m) suficiente como para aislar la serie situada a techo de los niveles acuíferos subyacentes del Tortoniense superior.

La falta de datos de piezometría y geometría del acuífero profundo le dan tal grado de incertidumbre que su estudio no puede ser abordado en esta tesis. La información de la que se dispone contribuye a pensar que muy probablemente exista conexión hidráulica con el acuífero superior, al menos en el NE del sistema. Dicha información procede de las columnas estratigráficas de las captaciones profundas de la DA-I, en las que se observa que el tramo de margas, que aísla el acuífero superior del inferior, no existe o no queda bien definido. Por otro lado, en los estudios llevados a cabo por el IGME en la zona se concluía que los acuíferos inferiores presentaban mayor carga hidráulica que los superiores, lo que posibilitaría que se produjera una alimentación desde el inferior hacia el superior, IGME-DPA (1994).

Las captaciones del acuífero Messiniense (pozos P-23 al P-33 de la DA-I), se caracterizan por tener un agua con conductividad superior a la del agua de mar. Las transmisividades evaluadas en ensayos de bombeo oscilan entre los 800 y 1400 m²/d.

Los estudios de seguimiento de calidad y piezometría realizados por la MCT-UPCT (2008 a 2011), el conjunto de las obras de captación de las desaladoras (salvo los pozos P-23 al P-33 de la DA-I) y el plan de vertidos, se refieren exclusivamente al funcionamiento del acuífero superior, por lo que éste será el objeto principal de análisis de esta tesis.

La alimentación de las captaciones, a través de las capas 2, 3 y 4, está asegurada por:

- La conexión hidráulica con el mar, y
- La conexión hidráulica entre las capas productivas anteriores esta condicionada por la presencia de discontinuidades, cambios laterales de facies y variaciones de espesor.

7.4. LÍMITES DEL ACUÍFERO

El acuífero costero Plioceno-Cuaternario del Campo de Elche, dentro del cual se encuentra incluido el acuífero costero de Agua Amarga, presenta un impermeable de base, como se dijo anteriormente, constituido por las margas y limos del Plioceno inferior (capa 5). Éstos afloran ampliamente en la ladera meridional de la Sierra del Colmenar (foto 7.4), delimitando el acuífero por el borde norte, y se extienden bajo éste con un buzamiento suave

hacia el sur y con un espesor medio de 25 m, suficiente para aislarlo del acuífero inferior Messiniense.



Foto 7.4. Afloramientos de margas y margo calizas del Plioceno buzando hacia el sur, en la Sierra del Colmenar. Al fondo se ve la depresión del Saladar de Agua Amarga, Urbanova y el mar Mediterráneo

Al oeste, el límite está abierto, en conexión hidráulica con el Cuaternario del Campo de Elche a través de las capas 3 y 4, IGME-DPA (1994). Existe un cambio de permeabilidad brusco de la capa 3 a partir del límite occidental de deposición de las calcarenitas del Tirreniense (capa 2), siendo estas más permeables que los materiales detríticos del Cuaternario continental, de litología heterogénea con niveles impermeables intercalados. Este cambio se refleja en la variación del gradiente observado en el mapa de isopiezas del 11-1-11 a unos 3 km de la costa. Los mapas de isopiezas indican, a su vez, que existe una alimentación de agua dulce procedente del oeste.

El límite oriental está ocupado por el mar, que en otros tipos de acuíferos costeros aprovechables se considera como un límite cerrado, ya que las explotaciones evitan por todos los medios que el agua salada entre en el continente. Sin embargo, en nuestro caso se trata de un límite abierto, ya que puede recibir una recarga infinita de agua de mar y, además, el acuífero se extiende bajo el mar, existiendo una conexión hídrica a través de las calcarenitas del Tirreniense. Sin embargo, por simplificar, se va a considerar que el límite coincide con la línea de costa.

El límite meridional viene condicionado por los afloramientos y subafloramientos del Plioceno inferior (capa 5) del norte de la Sierra de Santa Pola, situado a unos 7 km del límite septentrional. De acuerdo con los límites hidrogeológico que hemos establecido, el acuífero costero Plioceno-Cuaternario del Campo de Elche, tiene una superficie de 75 km², de los cuales solo 6 corresponden a afloramientos y subafloramientos de las calcarenitas del Tirreniense, que son las más transmisivas. Sin embargo, a efectos operativos, vamos a situarlo en un umbral (figuras 7.9 y 7.10) que coincide, aproximadamente, con la línea que une las

pistas del Aeropuerto y la urbanización de Urbanova. Esta consideración se fundamenta en los siguientes argumentos:

- El umbral piezométrico fue constatado en las campañas piezométricas de junio de 2004 y junio de 2005 (figuras 7.9 y 7.10, respectivamente).

- Por datos de geofísica, se interpretó la presencia de una fractura que eleva el sustrato margoso (figura 3.1), (IGME-DPA, 1994).

- Existe un cambio lateral de facies progresivo en el Plioceno superior hacia el sur, pasando a términos más margocalizos, con valores de permeabilidad relativamente bajos, (IGME-DPA, 1994).

- La citada línea coincide aproximadamente con la divisoria de aguas superficiales a la altura de El Altet, que se sitúa a una cota topográfica máxima de 20 m s.n.m., separando las depresiones endorreicas del Saladar de Agua Amarga (entre 1 y 4 m s.n.m.) y de El Salar de la Senieta (entre 6 y 8 m s.n.m.).

- La ausencia de datos al sur del saladar imposibilita el estudio de las relaciones entre el acuífero de Agua Amarga y las masas de agua subterráneas situadas al sur, entre el saladar y la Sierra de Santa Pola, las cuales guardarán una estrecha relación con las masas de agua superficiales de El Salar de la Senieta y El humedal del Clot de Galván.

Según las consideraciones realizadas acerca de los límites, la superficie del acuífero costero del Saladar de Agua Amarga es de 10 km². La escasa entidad del acuífero está de acuerdo con la definición que la CHJ hace para los acuíferos costeros situados en las subcuencas litorales del sur de Alicante, denominándolos como ‘acuíferos de interés local’.

7.5. PIEZOMETRÍA

7.5.1. ANTECEDENTES

No existe documentación sobre la piezometría del acuífero costero del Saladar de Agua Amarga con anterioridad a la construcción de la desaladora DA-I.; la única información existente se trata del ya mencionado trabajo de Rodríguez Estrella et al. (1992), en el que aparecen dos mapas de isopiezas correspondientes a los años 1986 (figura 7.5) y 1991 (figura 7.8). En ambas figuras se observa que el flujo en la zona del Saladar de Agua Amarga tenía en aquellas fechas un sentido ONO-ESE.

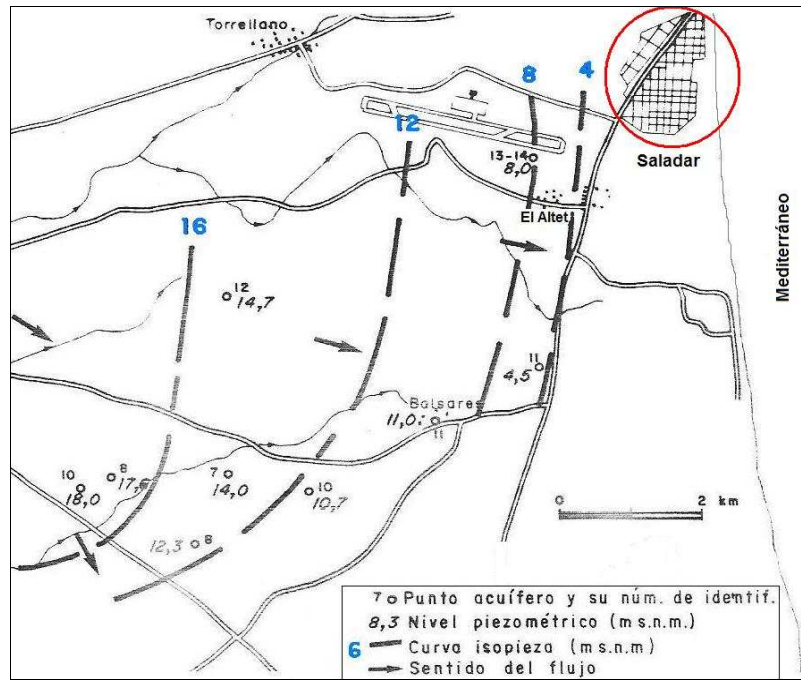


Figura 7.8. Mapa de isopiezas del entorno del Saladar en 1991 (Rodríguez Estrella et al., 1992)

El primer estudio piezométrico de detalle del Saladar de Agua Amarga y las zonas colindantes (figura 7.9) se llevó a cabo tras la puesta en marcha de los primeros pozos de explotación de la DA-I, en junio del año 2004 (Rodríguez Estrella et al., 2008).

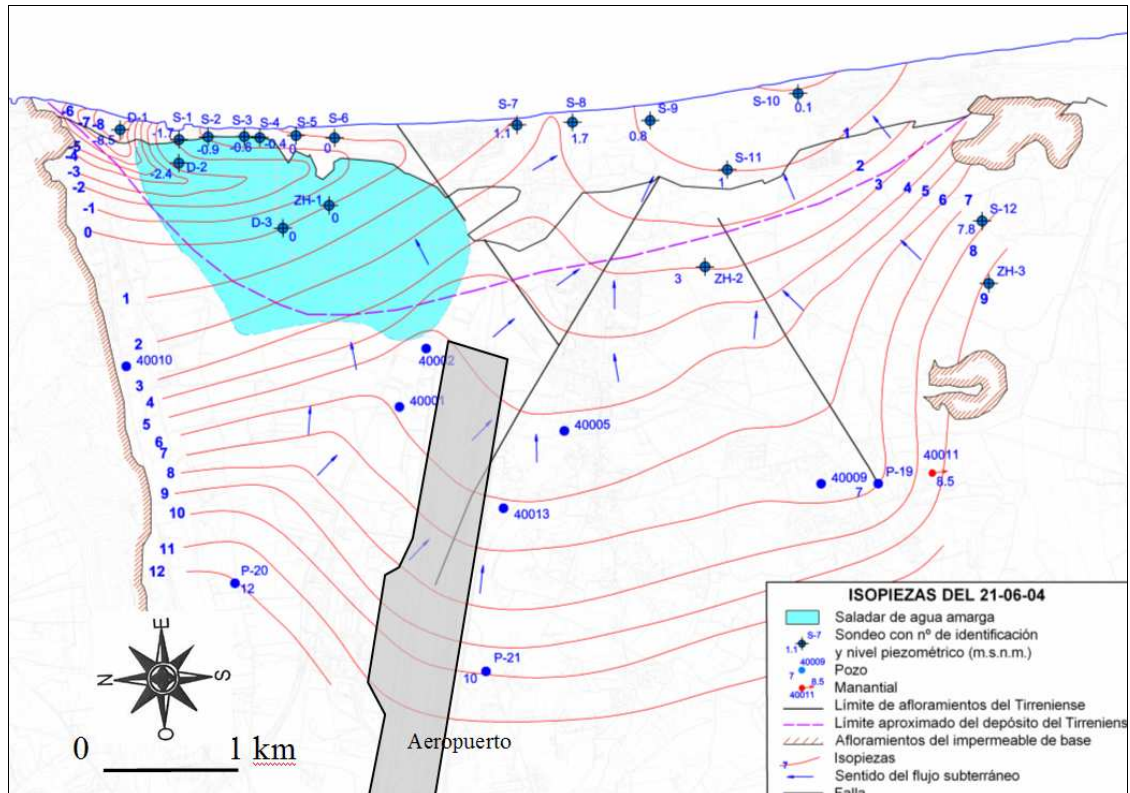


Figura 7.9. Mapa de isopiezas, elaborado a partir de los datos de la campaña de junio de 2004 (Rodríguez Estrella et al., 2008)

El mapa piezométrico se elaboró tomando los niveles de los piezómetros que se realizaron antes de la obra (con siglas S y D) y que captaban las calcarenitas marinas del Tirreniense (capa 2); además se consideraron los pozos ordinarios de la zona, propiedad de particulares, que captan agua de los terrenos detríticos del Cuaternario continental (capa 3), con el fin de deducir si existía o no una conexión hídrica entre ambas capas. De la observación de dicho mapa se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Existe una conexión hidráulica entre las rocas detríticas cuaternarias de origen marino y las continentales, y estas últimas alimentan a las primeras.
- El sentido de flujo es generalizado de oeste a este (hacia el mar).
- El gradiente hidráulico es más elevado en zonas retiradas de la costa y próximas a los límites laterales de afloramientos del impermeable de base (5 a 6 por mil). Por el contrario, disminuye próximo a la costa (2,5 a 3 por mil), ya que las calcarenitas del Tirreniense tienen una mayor transmisividad.
- La regla general anterior encuentra una excepción en el sector nororiental del acuífero, pues se dan gradientes del 2‰ y se registran niveles piezométricos negativos, de hasta -8,5 m; ello es debido al efecto que producen los bombeos de la desaladora DA-I (56 hm³/a), que provocan un conoide alargado paralelo a la costa, de casi 2 km de longitud.
- Se observan dos ejes de drenaje, condicionados por sendas fallas normales, de dirección N 120 E y N 70 E.

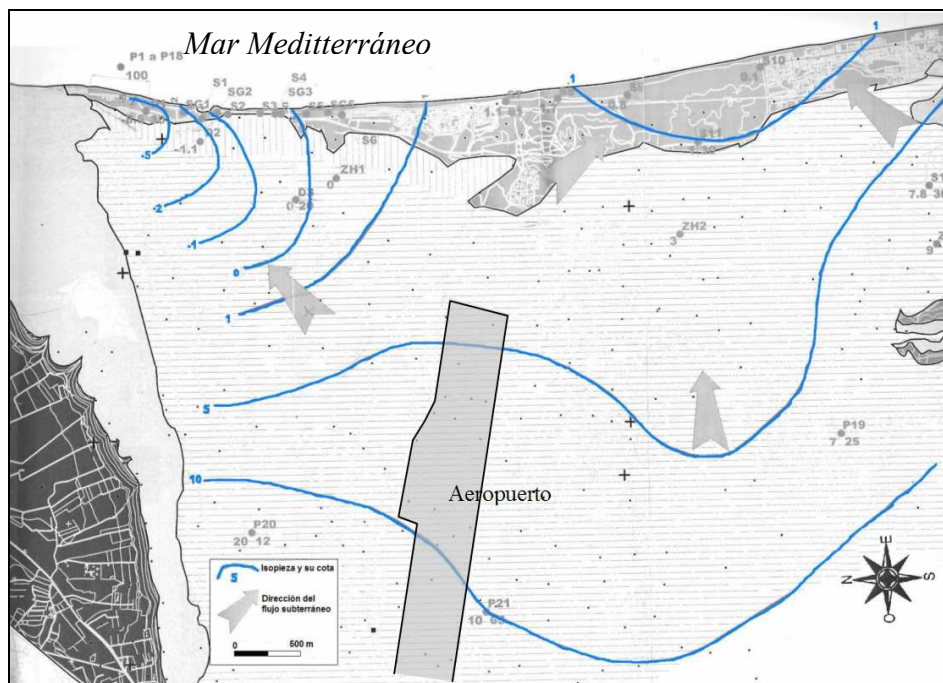


Figura 7.10. Mapa de isopiezas elaborado a partir de los datos de la campaña de junio de 2005

En junio de 2005 se realizó otra campaña piezométrica con motivo de la fase de investigación para la construcción de la DA-II, MMA-MCT y U.T.E. (2005). Del mapa de

isopiezas resultante (figura 7.10) se extraen conclusiones similares a las comentadas para el mapa de la campaña de 2004.

7.5.2. RED DE CONTROL

Para ver la influencia que podrían ejercer las extracciones del túnel de la DA-II al acuífero de Agua Amarga (los neodrenos de PHD no afectan a los acuíferos terrestres) era necesario instalar una red de control de las aguas subterráneas y analizar las variaciones de piezometría y de calidad química en dicho acuífero, especialmente, en la zona del saladar. Los sondeos de control se perforaron en dos fases y en varias etapas. Respecto a la primera fase, existe una primera etapa, en la que se perforaron 6 piezómetros (P-1 a P-6), entre el 15 y 30 de Septiembre del 2007, y una segunda de 10 más (P-7 a P-16), entre Febrero y Marzo del 2008. Se cogió además, como piezómetro, el sondeo D-2, el único que quedaba útil perteneciente a la etapa de investigación, previa a la construcción del túnel; por tanto, la red vinculada a la Desaladora DA-II estaba formada en una primera fase por 17 piezómetros, en los que se viene tomando medidas mensuales de forma regular desde 15-5-08, de piezometría, y de conductividad y temperatura en toda la columna de agua de los sondeos, cada metro. En una segunda fase, se perforaron 5 sondeos de control más entre septiembre y diciembre del 2010.

Puesto que ya se había demostrado claramente (figuras 7.9 y 7.10) que la zona de estudio de la DA-II tenía relación hidrogeológica con la de la DA-I, era necesario realizar también observaciones en esta última, teniendo en cuenta que el primer sondeo vertical de la DA-I dista 400 m de la boca de entrada del túnel. Desde febrero del 2010, se toman medidas en 3 pozos inactivos (pero útiles) de la desaladora DA-I, (DI-4, DI-12 y DI-18) y en un sondeo de investigación (I-3). Para ello se realizó una nivelación de las bocas de cada pozo y se efectuó un análisis geológico e hidrogeológico de los mismos a partir del estudio de los informes de las empresas constructoras. Por tanto, el número de puntos de control en la actualidad es de 26, de los cuales 22 corresponden a la DA-II y 4 a la DA-I (aunque recientemente se han inutilizado 4 pertenecientes a la DA-II, próximos a la playa: P-12, P-14, P-15 y P-16).

Con el fin de conocer la distancia de afección de las explotaciones de las DA-I y DA-II a los pozos del Campo de Elche, se tomaron (sólo para esta tesis) dos piezómetros más (P-30 y P-31), que corresponden a pozo ordinario y sondeo, y en ellos se han recogido medidas mensuales de piezometría, conductividad y temperatura del agua, desde el 4-5-2010. Incluyendo estos dos, la red de control está constituida por 23 puntos. Las características de los puntos de control se resumen en la tabla 7.2, mientras que la figura 7.11 muestra la Red de Control en enero de 2011.

Piezómetro	tipo	Prof obra m	Material captado	Fecha	Ranurado	Diámetro	observ.
P-1	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno, arenas Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	sep-07	completo	63 mm	
P-2	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	sep-07	completo	63 mm	
P-3	Piezómetro	20	Arenas limosas Plio-Pleistoceno	sep-07	completo	63 mm	
P-4	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	sep-07	completo	63 mm	
P-5	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	sep-07	completo	63 mm	
P-6	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno, arenas Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	sep-07	completo	63 mm	
P-7	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno, arenas Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	
P-8	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	
P-9	Piezómetro	20	Arenas Holoceno, calcarenitas Tirreniense y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	
P-10	Piezómetro	20	Calcarenitas Tirreniense y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	
P-11	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno, arenas Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	
P-12	Piezómetro	20	Arcillas con sal Holoceno, arenas Holoceno y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	inutilizado desde oct-2009
P-13	Piezómetro	20	Arenas Holoceno, calcarenitas Tirreniense y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	
P-14	Piezómetro	20	Arenas Holoceno, calcarenitas Tirreniense y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	inutilizado desde oct-2009
P-15	Piezómetro	20	Arenas Holoceno, calcarenitas Tirreniense y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	inutilizado desde jul-2009
P-16	Piezómetro	20	Arenas Holoceno, calcarenitas Tirreniense y arenas limosas Plio-Pleistoceno	mar-08	completo	63 mm	inutilizado desde ago-2010
P-17	Piezómetro	30	Gravas y limos del Pleistoceno, areniscas del Plioceno	ene-11	completo	63 mm	
P-18	Piezómetro	20	Limos, gravas y caliches 'F.Sucina' y areniscas Plioceno superior	ene-11	completo	63 mm	
P-19	Piezómetro	20	Limos, gravas y caliches 'F.Sucina' y areniscas Plioceno superior	ene-11	completo	63 mm	
P-20	Piezómetro	20	Limos arenosos del Cuaternario y calcarenitas oolíticas del Tirreniense	ene-11	completo	63 mm	
P-21	Piezómetro	20	Limos, gravas y caliches 'F.Sucina' y areniscas Plioceno superior	ene-11	completo	63 mm	

Tabla 7.2. Características de la Red de Control del acuífero costero de Agua Amarga en el entorno del saladar

Piezómetro	tipo	Prof obra m	Material captado	Fecha	Ranurado	Diámetro	observ.
I-3 (sondeo -3)	Investigación	150	Messiniense superior. Calizas, margas y calcarenitas	11-15 diciembre 2000	a partir de 50 m y alternando	650	se sellaron los 90 últimos m
DI-4 (P-4 de DA-I)	Pozo extracción	55	calcarenita Pleist.-areniscas Plioc.	26/4/2002 al 5/6/2002	12-50 metros	500	con arqueta
DI-12 (P-12 de DA-I)	Pozo extracción	55	calcarenita Pleist.-areniscas Plioc.	26/4/2002 al 5/6/2002	12-50 metros	500	con arqueta
DI-18 (P-18 de DA-I)	Pozo extracción	50	calcarenita Pleist.-areniscas Plioc.			500	con arqueta
P-30	Pozo manual	12.77	Pleistoceno			3-4 m	con arqueta
P-31	pozo abandonado	22.8	Plioceno-Pleistoceno			280 mm	con arqueta
D-2	Piezómetro	30	Calcarenitas Pleistoceno,			220	

Tabla 7.2. (Continuación). Características de la Red de Control del acuífero costero de Agua Amarga en el entorno del saladar

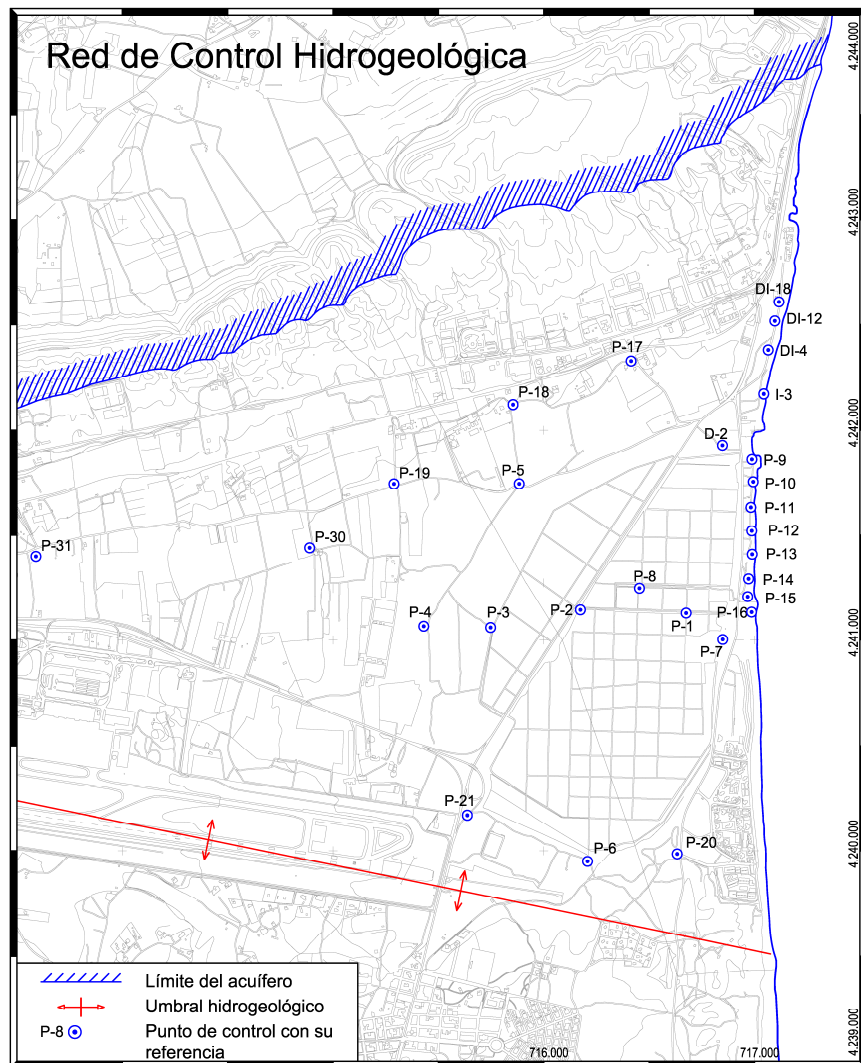


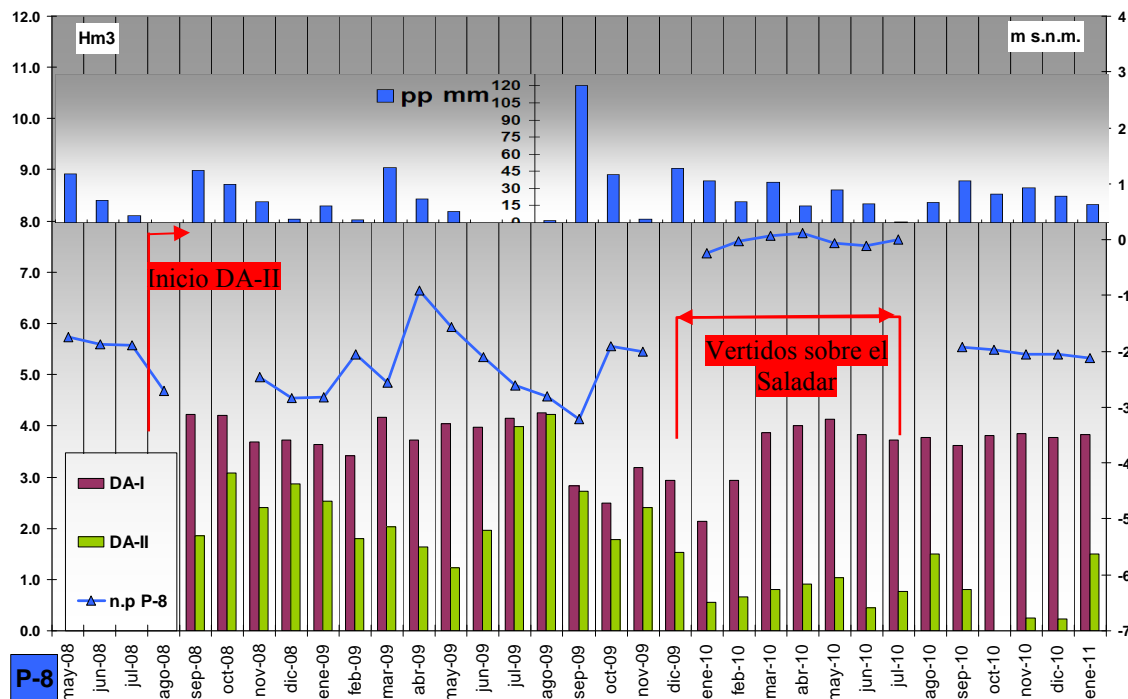
Figura 7.11. Mapa de situación de los puntos de control que conforman la red en enero de 2011

7.5.3. EVOLUCIÓN DE LA PIEZOMETRÍA

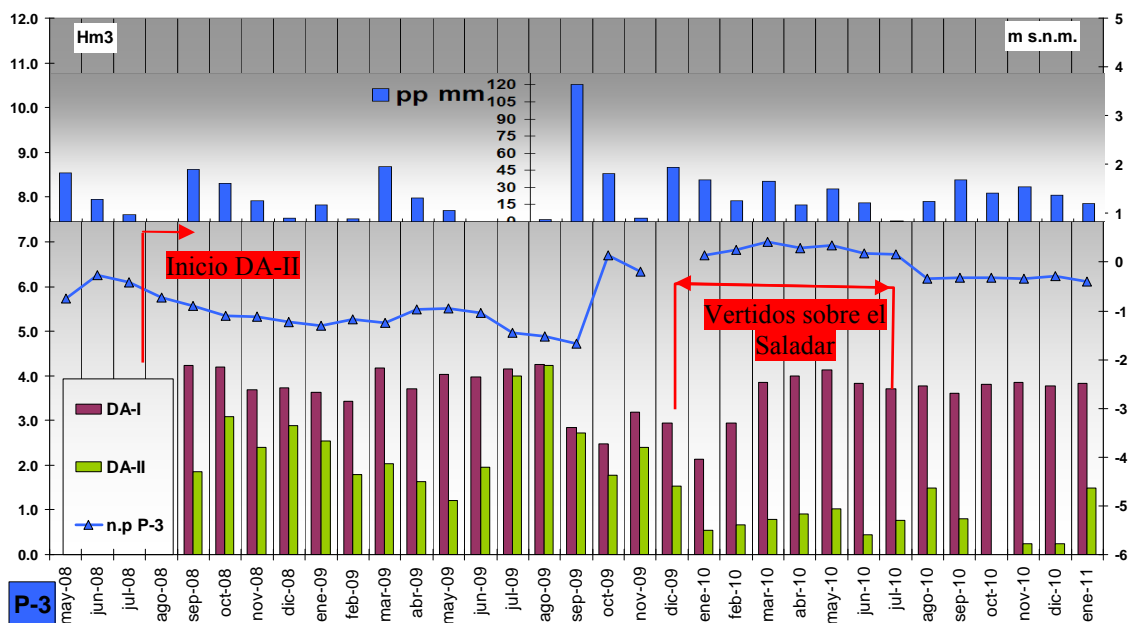
El estudio de la piezometría comprende el periodo de mayo de 2008 a enero de 2011, durante el cual se efectuaron campañas de campo mensuales. El conjunto de evolución de los niveles de los piezómetros de la red de control se encuentra en el Anexo 3.

7.5.3.1. Evolución de la piezometría en el saladar y su entorno

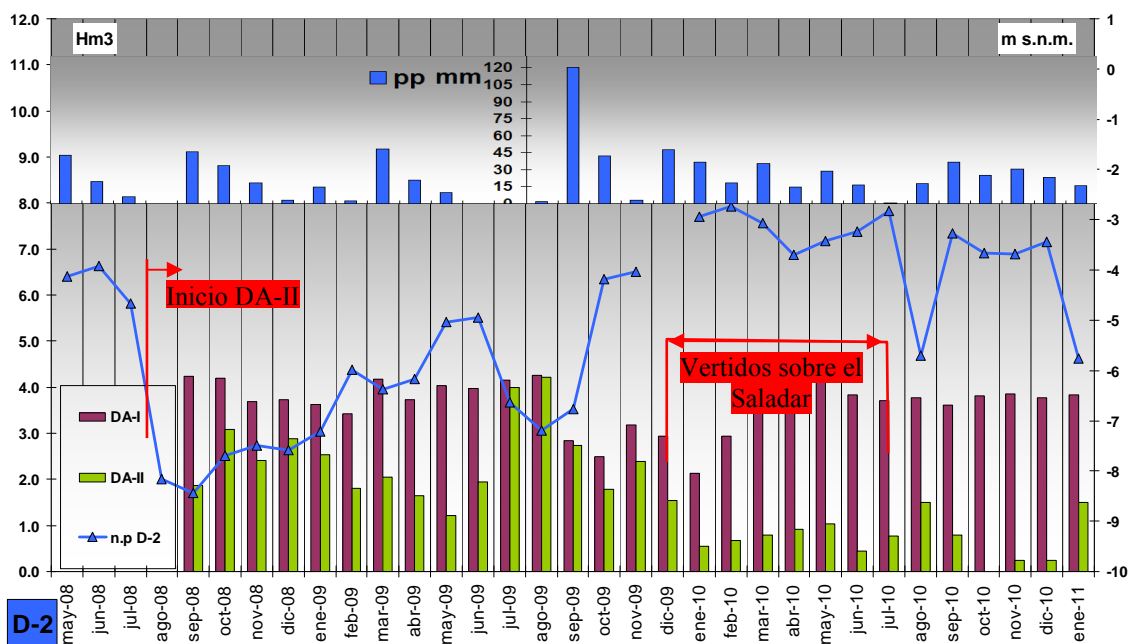
Las oscilaciones piezométricas (amplitudes) se sitúan entre 1 y -6 m s.n. (P-1 a P-8) y -2 y -9 (D-2, situado junto a las extracciones de la DA-I). Para ilustrar los factores que han podido influir sobre las evoluciones piezométrica en la zona del saladar, se muestran los gráficos de evolución de los piezómetros P-3 (borde occidental del saladar), P-8 (en el saladar) y D-2 (próximo a los bombeos de las desaladoras). Junto a dichos gráficos se representan las lluvias mensuales y los volúmenes de extracción de las desaladoras (figuras 7.12-7.14). Además, se ha incluido la fecha del comienzo de la explotación en el túnel (finales de julio de 2008) y la fecha de inicio y fin de los vertidos sobre el saladar, acorde con el programa de vertidos (inicio en la primera mitad de diciembre de 2009 y finalizado temporalmente a mediados de julio de 2010).



Figuras 7.12. Gráfico de evolución mensual del nivel en el piezómetro P-8 (en el saladar), mostrando la explotación de las desaladoras DA-I y DA-II y las lluvias acumuladas durante el periodo mayo-08/enero-11



Figuras 7.13. Gráfico de evolución mensual del nivel en el piezómetro P-3 (al oeste del saladar), mostrando la explotación de las desaladoras DA-I y DA-II y las lluvias acumuladas durante el periodo mayo-08/enero-11



Figuras 7.14. Gráfico de evolución mensual del nivel en el piezómetro D-2 (próximo a los bombes de las desaladoras), mostrando la explotación de las desaladoras DA-I y DA-II y las lluvias acumuladas durante el periodo mayo-08/ enero-11

De la observación de estas figuras y del conjunto de gráficos de evolución piezométrica (Anexo 3) se pueden extraer las siguientes conclusiones:

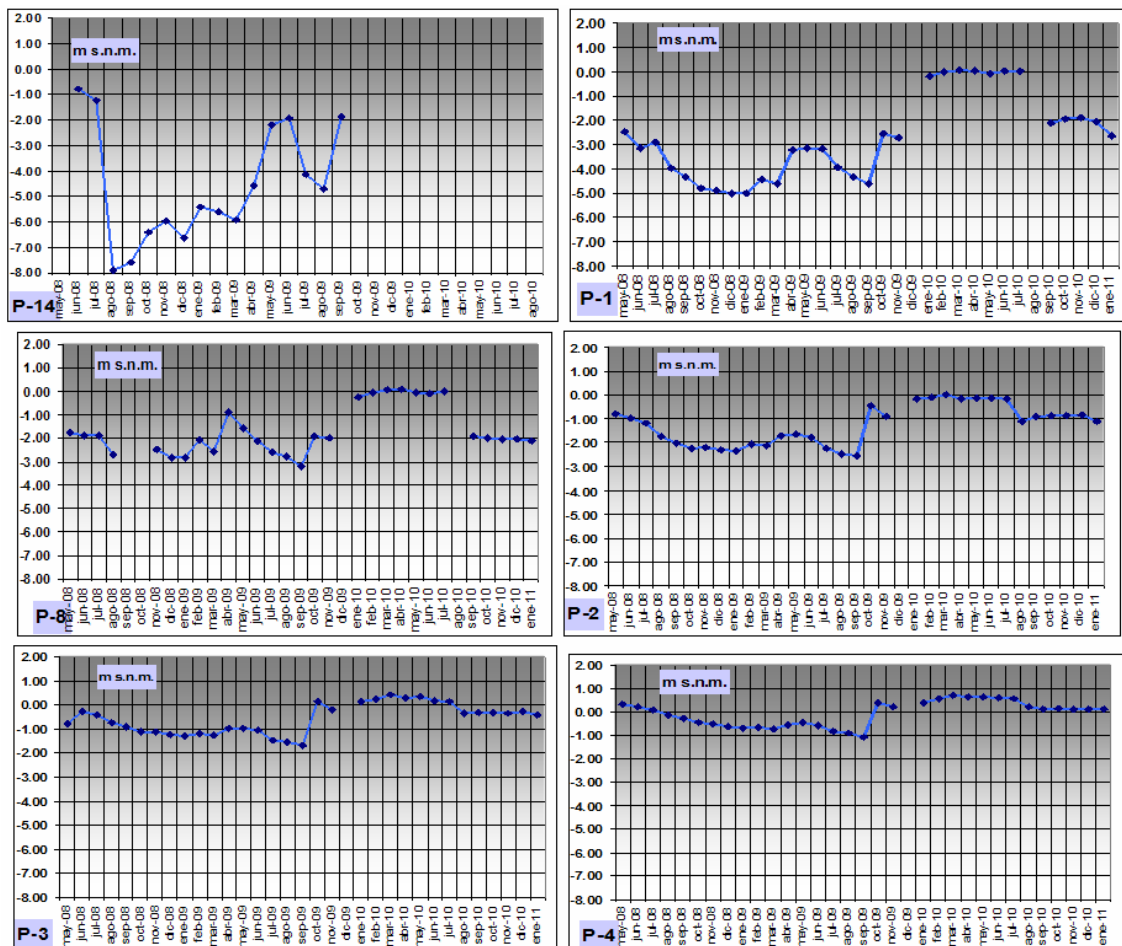
- Los efectos de los eventos lluviosos significativos para la zona (por ejemplo, los de septiembre de 2009) quedan reflejados en ascensos de los niveles piezométricos.

- También los niveles piezométricos son muy sensibles a las variaciones de los volúmenes extraídos por las desaladoras, coincidiendo las etapas de aumento (julio y agosto de 2009) o disminución (octubre, noviembre y diciembre de 2009) de la explotación con descensos o aumentos de los niveles piezométricos, respectivamente. La influencia de la puesta en marcha de la DA-II se manifiesta en todos los piezómetros.

- El efecto de los vertidos sobre la superficie del saladar se aprecia en todos los piezómetros, manteniendo sus niveles piezométricos en los valores más altos desde que se tiene registro de los mismos.

- En agosto de 2010 se produce un descenso piezométrico tangible en todos los piezómetros, motivado por el cese de los vertidos sobre el saladar y un leve aumento en la explotación de la DA-II.

- A partir de agosto de 2010 y hasta enero de 2011, se produce una estabilización de niveles debido a la disminución de la explotación en la DA-II y a las lluvias caídas durante el periodo (a pesar de que cesaron los riegos).



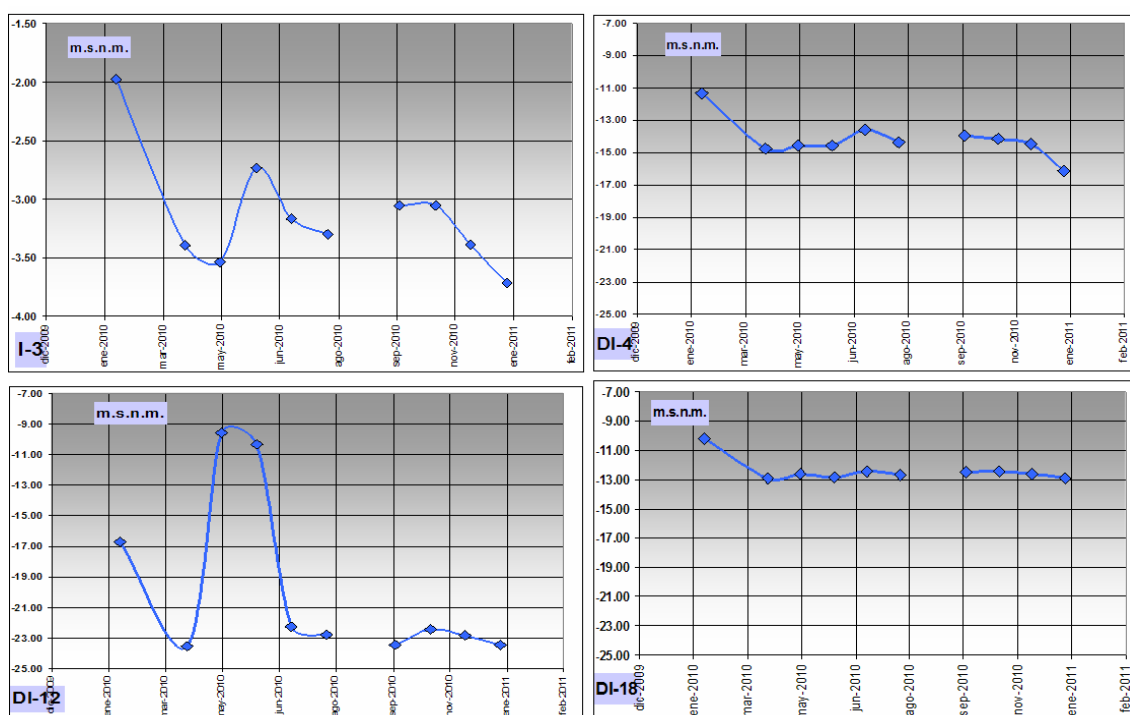
Figuras 7.15. Evoluciones del nivel en piezómetros ubicados en una línea perpendicular al túnel y situados cada vez más alejados del mismo (P-14, P-1, P-8, P-2, P-3 y P-4, del más próximo al más lejano). Se aprecia que la amplitud de las oscilaciones disminuye conforme los piezómetros se alejan del túnel

En relación con los radios de influencia del drenaje en el túnel, la amplitud de las oscilaciones piezométricas evaluadas a lo largo del periodo es mayor en los piezómetros más próximos a las captaciones. Esta diferenciación en las fluctuaciones se observa en los piezómetros P-14, P-1, P-8, P-2, P-3 y P-4, de una línea perpendicular al túnel, y situados (en este orden) cada vez más alejados del túnel (figura 7.15).

7.5.3.2. Evolución de la piezometría en las captaciones de la DA-I

La amplitud de las oscilaciones piezométricas de los pozos DI-4, DI-12, DI-18 y el sondeo I-3 (todos de 50 m de profundidad), varía en función de la proximidad a los pozos de extracción y de la transmisividad del terreno en el entorno de estos piezómetros. Los niveles fluctúan entre -2 (I-3) y -23 (DI-12) (figura 7.16). Los ascensos bruscos y puntuales del pozo DI-12, pueden explicarse por la coincidencia del día en el que se efectuaron las medidas con el de parada de algún pozo de extracción próximo. Los niveles piezométricos en los pozos DI-4, 12 y 18, apenas experimentan variaciones desde de junio de 2010, coincidiendo con la fecha a partir de la cual se estabilizan las extracciones de la DA-I en torno a $3,7 \text{ hm}^3/\text{mes}$.

Las medidas efectuadas en estos pozos reflejan los valores reales de la piezometría dinámica en dichos puntos ya que, al no tener bombas, no se ven afectados por la pérdida de carga. Por tanto, la profundidad media del nivel piezométrico en los pozos DI-4 y DI-18 (en torno a -13 m s.n.m.), representa la profundidad de la base del cono de bombeo en régimen permanente correspondiente a la etapa de estabilización de las extracciones de la DA-I ($3,8 \text{ hm}^3/\text{mes}$) desde marzo de 2010.



Figuras 7.16. Evoluciones piezométricas de los pozos situados junto a las captaciones de la DA-I

Al igual que ocurre con el radio de influencia del drenaje del túnel, en el caso de las captaciones de la DA-I también se aprecia que a lo largo de la sección piezométrica formada por DI-12, D-2, P-8 y P-6 (donde, del primero al último, aumenta la distancia respecto al cono ocasionado por los bombeos), los piezómetros presentan oscilaciones piezométricas más suaves y de menor amplitud conforme se alejan del cono de bombeo (figura 7.17).

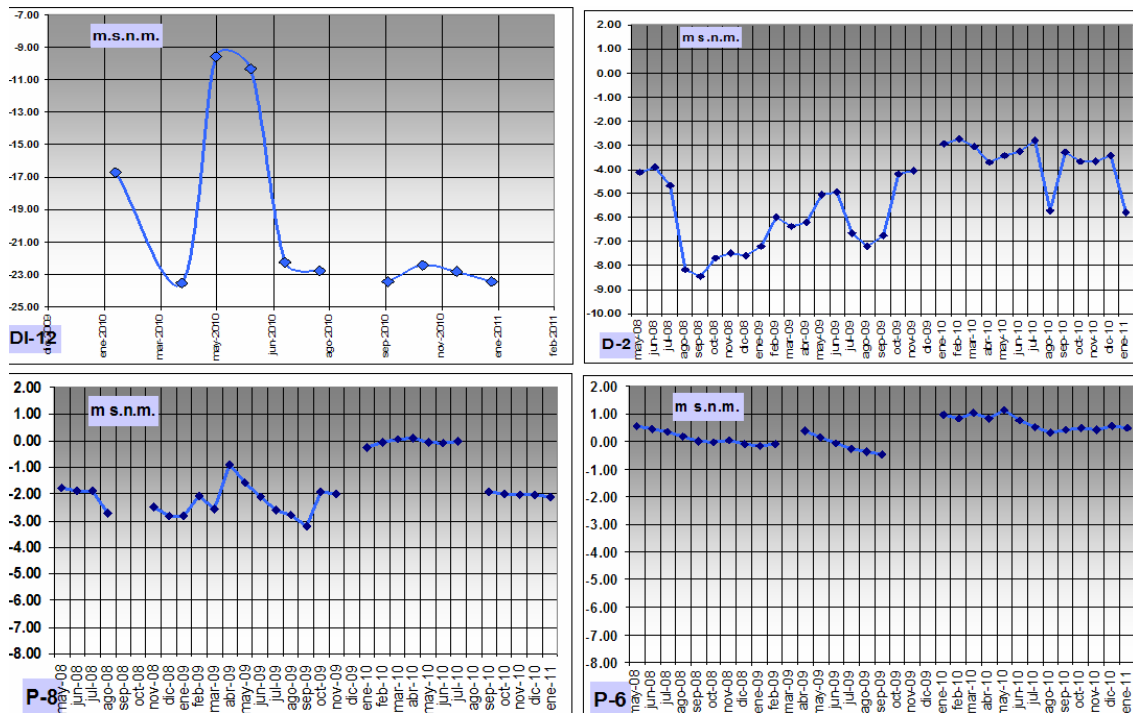


Figura 7.17. Evoluciones del nivel en los piezómetros DI-12, D-2, P-8 y P-6, situados, del primero al último, cada vez más próximos al cono de bombeo de la DA-I. Se aprecia que la amplitud de las oscilaciones disminuye conforme los piezómetros se alejan del cono de bombeo

7.5.3.3. Evolución de la piezometría en la línea de costa

Al igual que se hizo con los piezómetros situados en la zona del saladar, para ilustrar los factores que han podido influir sobre las evoluciones piezométricas la línea de costa se muestran los gráficos de evolución del piezómetro P-13, junto con las lluvias mensuales y los volúmenes de extracción de las desaladoras (figuras 7.18).

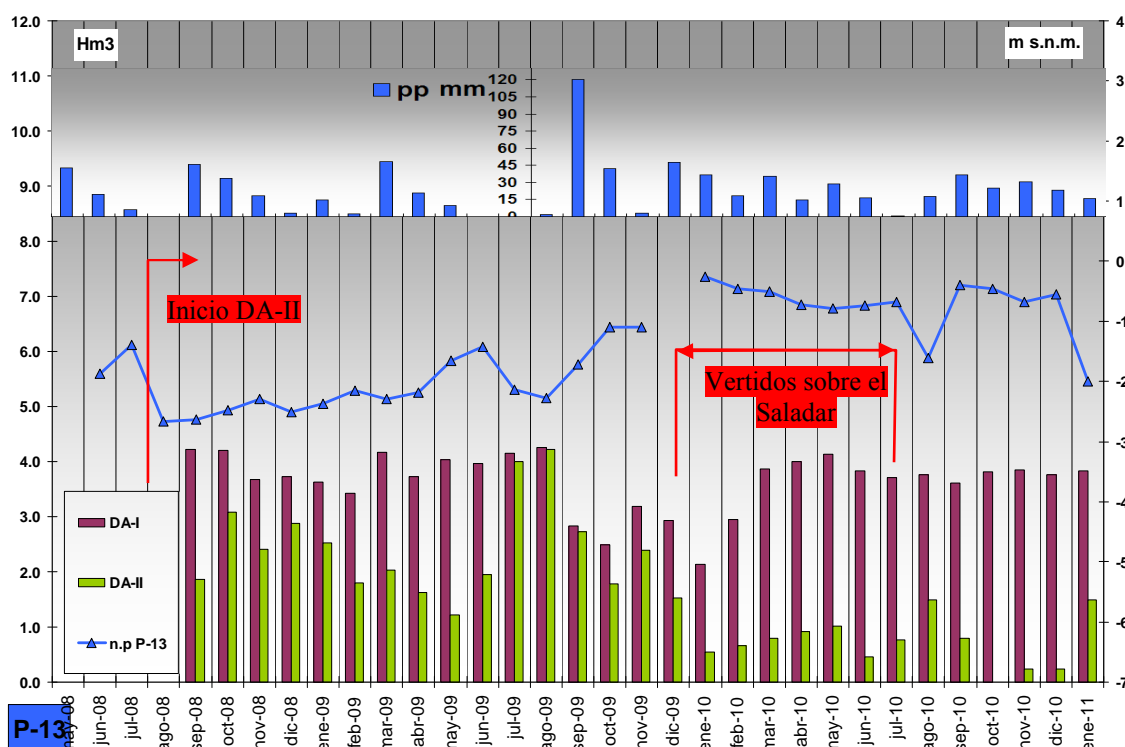


Figura 7.18. Gráfico de evolución mensual del nivel en el piezómetro P-13 (en la línea de costa), mostrando la explotación de las desaladoras DA-I y DA-II y las lluvias acumuladas durante el periodo mayo-08/enero-11

De la observación de esta figura se pueden extraer las siguientes conclusiones:

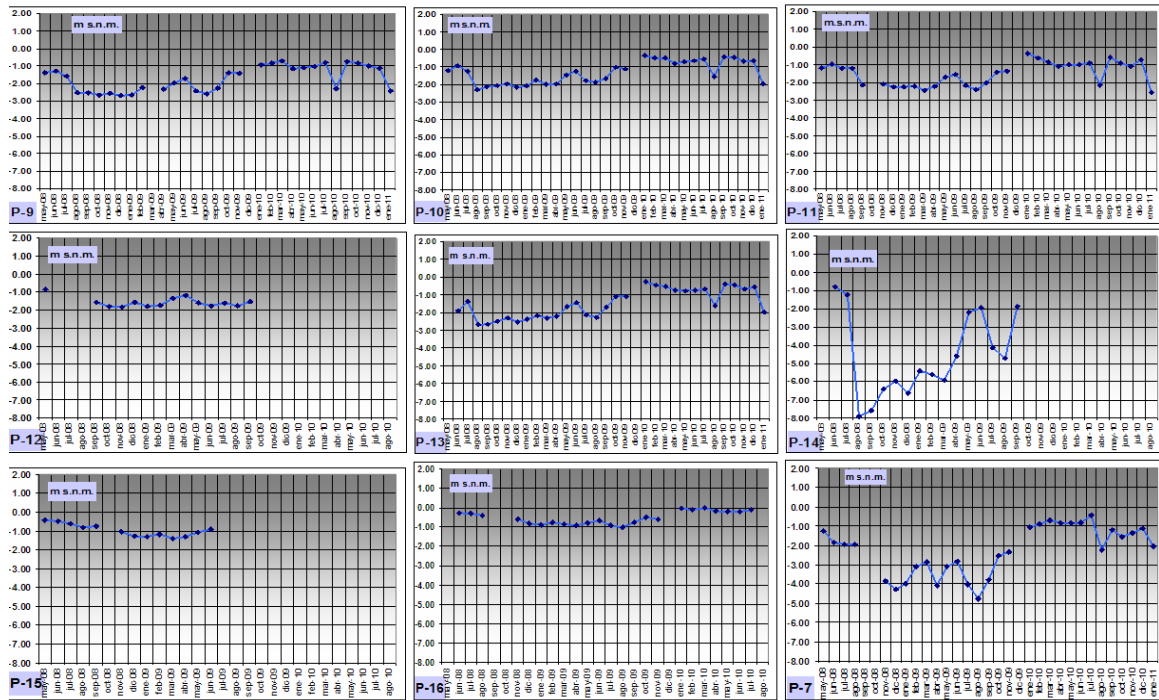
- Caben las mismas consideraciones del apartado 7.5.3.1.

- La variación de los niveles en los piezómetros de la línea de costa parece estar más condicionada por el ritmo de extracciones de la DA-II. Los valores más altos de piezometría se han dado durante el año 2010, coincidiendo con los valores más bajos en las extracciones de la DA-II, lo cual puede verse en el periodo septiembre a diciembre, en el que no se realizaron riegos.

- El cese de riegos en el saladar ocasiona un descenso brusco del nivel piezométrico (superior a 1,5 m), que viene acentuado, además, por un aumento de las extracciones.

- En septiembre de 2010 se produce un ascenso (equiparable al descenso anterior), motivado por una disminución de las extracciones y un aumento en las precipitaciones.

En la figura 7.19 se han representado las variaciones del nivel en los piezómetros situados entre la línea de costa y el saladar (del P-9 al P-16, además del P-7).



Figuras 7.19. Evoluciones del nivel en los piezómetros situados en la línea de costa

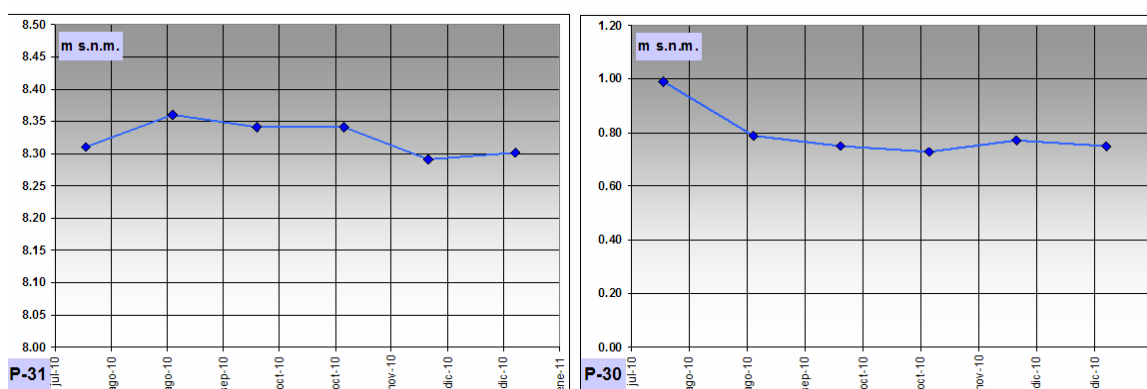
De la observación de la figura se puede deducir lo siguiente:

- La heterogeneidad litológica del medio acuífero y la presencia de fracturas, que condicionan la distribución espacial de la conductividad hidráulica, podría explicar porqué existe un comportamiento dispar entre piezómetros frente a acciones externas comunes ejercidas sobre el acuífero. Así, comparando la amplitud de la variación del nivel, se aprecia cómo en P-16 apenas llega a 1 m, mientras que el P-13 se aproxima a los 3 m. Un caso extremo sería el P-14, cuyo rango de oscilación se aproxima a los 7 m. La conexión del P-16 con el mar, que supone un borde de piezometría constante, es mucho mejor que en el resto, ya que además su registro de niveles se encuentra próximo al nivel del mar (0 m.s.n.m.). El P-14, sin embargo, está más influenciado por lo que ocurre hacia el continente y por ello en sus oscilaciones se nota menos la conexión con un borde de piezometría constante como es el mar.
- Algunas fluctuaciones piezométricas pueden verse afectadas por las oscilaciones diarias de la mareas del Mediterráneo, que en la zona de Alicante pueden alcanzar 50 cm, según MMA-MCT y U.T.E. (2005).
- Existe una tendencia general a la recuperación de los niveles piezométricos, que se asocia, como se dijo anteriormente, a la disminución de la explotación de la DA-II.

- El descenso producido en enero de 2011, apreciable también en el piezómetro D-2 (en el saladar), se explica por el reinicio de la explotación de la DA-II durante dicho mes.

7.5.3.4. Evolución de la piezometría en los pozos alejados del saladar

En la zona continental apenas existen pozos, pues la mala calidad del acuífero hace que sean inutilizables. Sin embargo, durante los recorridos por itinerarios geológicos, se descubrieron dos pozos de explotación agrícola abandonados, el P-30 y el P-31, situados a 2100 y 3500 m de la línea de costa, respectivamente, al oeste del saladar. Desde agosto de 2010 se realizan registros de nivel piezométrico y en la figura 7.20 pueden verse sus evoluciones piezométricas.



Figuras 7.20. Evoluciones del nivel en los pozos P-31 y P-30

Las variaciones de nivel que presentan estos pozos son muy reducidas (entre 0,7 y 1,0 m s.n.m. para el P-30 y entre 8,29 y 8,36 m s.n.m. para el P-31), dada su lejanía respecto a la influencia de las captaciones de las desaladoras. El periodo estudiado aún es muy corto para establecer la tendencia; sin embargo, parece observarse que el P-30 es el último sondeo que se ve afectado por las actuaciones de las Desaladoras de Alicante I y II (la afección tierra adentro, por tanto es de poco más de 2 km desde la costa), ya que en el P-31 no se aprecian variaciones notables, y, desde luego, las que se observan no son correlacionables con las actuaciones realizadas en las desaladoras.

7.5.4. MAPAS DE ISOPIEZAS

Los niveles piezométricos en la zona del saladar están condicionados por las concentraciones de sal en agua. El Anexo 4 muestra la variación de la carga hidráulica con la profundidad, condicionada por las variaciones de salinidad (densidad), y su diferencia respecto a columna de agua dulce, para cuatro piezómetros representativos de la variedad en concentraciones de sal existente en las aguas subterráneas (P-4, P-2, D-2 y P-8, en orden de menor a mayor salinidad). Los niveles se han obtenido a partir de los datos de conductividad eléctrica corregidos respecto a la temperatura y traducidos a concentración, de acuerdo con la

ecuación (8.2) de Holzbecher (1998), $c = -3.83 + (0.699)ce$, donde c es la concentración en mg/l, y ce es la conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el mismo Anexo se presenta el error relativo asociado a cada profundidad. De estas tablas se deduce que las desviaciones de los piezómetros P-4, P-2 y D-2 (0,58, 1,11 y 2,96% respectivamente) pueden considerarse despreciables, mientras que las del piezómetro P-8, de mayor concentración salina, es relativamente alta (11'40%). Esto indica que el movimiento del agua en profundidad podría no corresponder con el que tiene lugar en superficie y que se interpreta a partir de los mapas de piezometría, existiendo fenómenos de recirculación de flujo en profundidad. Para determinar el movimiento local del agua subterránea, la tabla 7.3 ilustra las cargas hidráulicas de los anteriores piezómetros a diferentes profundidades. Así, por ejemplo, para los piezómetros P-2 y P-8, el movimiento de agua en superficie se dirige de P-2 a P-8, mientras que a mayor profundidad, el movimiento tendría lugar en sentido contrario. Lo mismo ocurre con los piezómetros P-4 y D-2.

	Profundidad, respecto al suelo (m)	P-4	P-2	D-2	P-8	Sentido de flujo (ordenados de mayor a menor carga hidráulica)
Nivel piezométrico m s.n.m. (presión atmosférica)		-0,57	-0,16	-3,69	-0,25	P-2; P-8; P-4; D-2
Carga hidráulica	3	0	3,02	0	3,24	P-2; P-8
	4	0	4,03	1,03	4,38	P-8; P-2; D-2; P-4
	8	4,02	8,07	5,14	8,94	P-8; P-2; D-2; P-4
	13	9,05	13,12	10,29	14,64	P-8; P-2; D-2; P-4
	16	12,07	16,15	13,38	18,06	P-8; P-2; D-2; P-4
	20	-	20,22	17,49	-	P-2; D-2

Tabla 7.3. Variaciones de la carga hidráulica con la profundidad en los piezómetros P-4, P-3, D-2 y P-8

En el Capítulo 8 se demuestra cómo la piezometría varía con la profundidad, debido a la distribución de concentraciones.

Desde marzo de 2008 la UPCT realiza, para la MCT, medidas mensuales de piezometría para el control de las oscilaciones piezométricas bajo el humedal. Durante los años 2008, 2009, 2010 y 2011, la MCT-UPCT ha emitido 5 informes para el seguimiento piezométrico y de calidad química del acuífero costero del Saladar de Agua Amarga. En cada informe se elaboró un mapa de isopiezas; estos se muestran en las figuras 7.21 y 7.22.

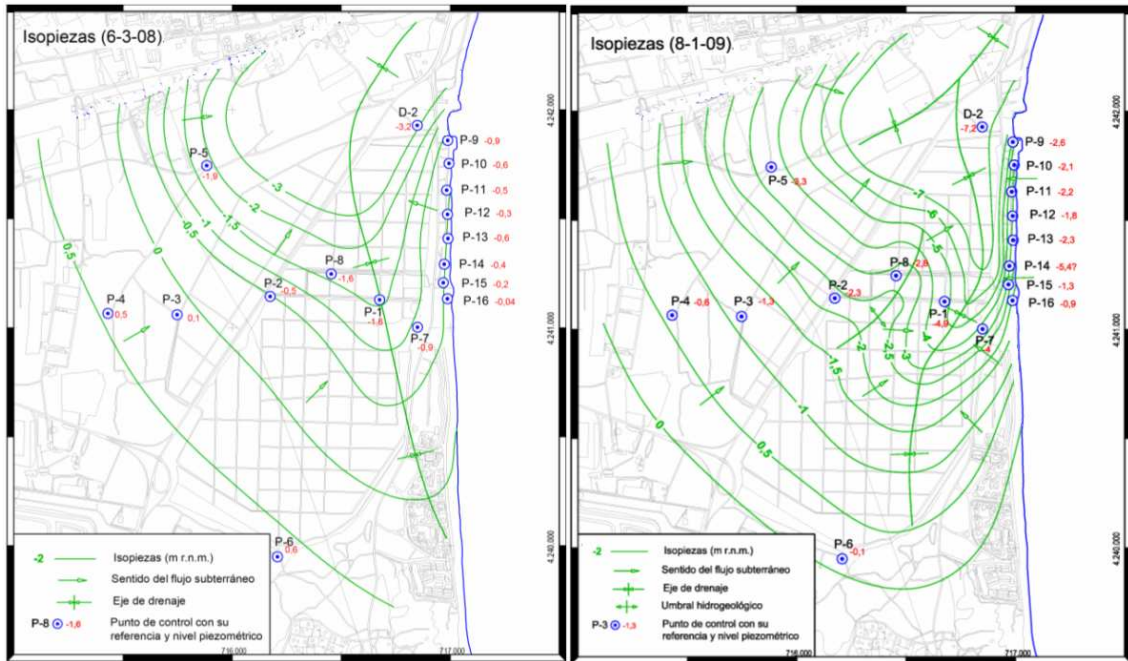


Figura 7.21 Mapas de isopiezas correspondientes a marzo de 2008 (izquierda) y enero de 2009 (derecha)

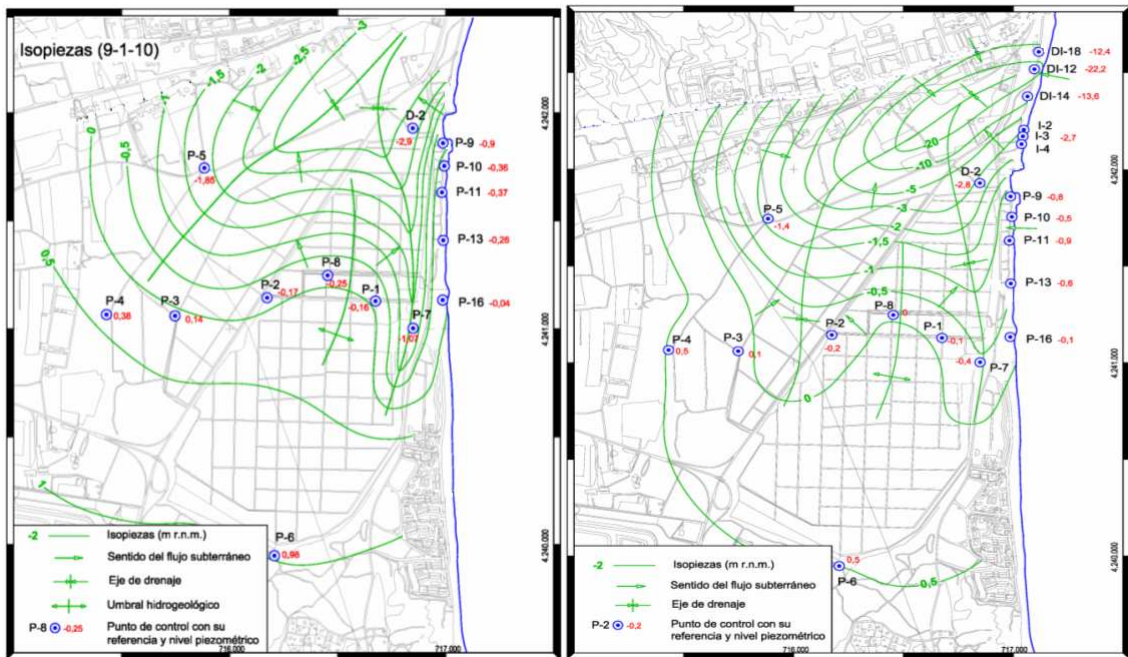


Figura 7.22. Mapas de isopiezas correspondientes a enero de 2010 (izquierda) y julio de 2010 (derecha)

El mapa correspondiente a marzo de 2008 guarda similitud con los precedentes de 2004 y 2005, cuando todavía no se había puesto en explotación la DA-II. El flujo desde el continente se dirige en sentido noreste hacia el cono de bombeo generado por las captaciones de la DA-I, situadas al noreste del saladar junto a la línea de costa. El cono de depresión también provoca la entrada de agua de mar hacia el mismo. El eje de drenaje principal norte-

sur transcurre bajo el saladar, donde los niveles piezométricos se sitúan entre 0,5 y -3,0 m s.n.m.

En el mapa piezométrico de enero de 2009 se aprecia ya el efecto causado por el drenaje del túnel. Por un lado, bajo el saladar se produce un descenso generalizado de los niveles piezométricos, pasando los valores mínimos de -3 m.s.n.m., en la campaña de 2008, a valores de -7 m s.n.m., causando un aumento del gradiente hidráulico tanto desde el mar (40‰) como desde el continente (15‰). La descarga se produce a través del mismo eje de drenaje, que transcurre más próximo al eje del túnel. Al noroeste del saladar existe otro eje de drenaje de dirección principal suroeste-noreste, separado del anterior por un leve umbral paralelo a la carretera N-332.

En enero de 2010 comienza a apreciarse el efecto de los riegos sobre la superficie del saladar, iniciados a mediados de diciembre de 2009. El umbral piezométrico desarrollado entre los dos ejes de drenaje principales se ensancha en la zona del saladar, debido a la alimentación artificial. Bajo la superficie del saladar se produce una recuperación de los niveles piezométricos, alcanzando valores comprendidos entre 0,5 y -3 m s.n.m., y una disminución de los gradientes hidráulicos.

En julio de 2010 continúan los riegos sobre la superficie del saladar, por lo que no se aprecian grandes cambios respecto a la situación de enero. El gradiente hidráulico desde el mar en torno al eje de dirección norte-sur situado bajo la superficie del saladar disminuye debido, en parte, a la reducción de explotación en la DA-II durante el periodo enero-julio de 2010. Con motivo de la incorporación de nuevos piezómetros (DI-4, DI-12 y DI-18) situados junto a los pozos de extracción de la DA-I, al noreste del saladar, se ha podido medir el nivel en las inmediaciones de estos pozos. Dicho nivel alcanza cotas de hasta -20 m.s.n.m., con un valor medio en torno a -13 m s.n.m. Los valores registrados en estos piezómetros indican que desde la línea de costa hacia los pozos de extracción existe un gradiente piezométrico en torno al 200 ‰.

Por último, con motivo de la incorporación de 5 nuevos piezómetros en la red de control piezométrica (P-17 a P-21), se ha realizado un mapa de piezometría, correspondiente a la campaña del 11 de enero de 2011 (figura 7.23), en el que también se han incorporado las medidas de los pozos P-30 y P-31, que hasta ahora no habían sido utilizadas.

umbral hidrogeológico que existía con anterioridad entre ambos ejes de drenaje, debido a la ausencia de riegos desde el 16-7-10.

2º) Al haberse realizado los sondeos P-17, P-18 y P-19, se ha podido observar que existe una conexión hidrogeológica entre las areniscas del Plioceno de la Sierra del Colmenar y las calcarenitas oolíticas del Tirreniense.

3º) Debido a la ausencia de riegos desde el 16-7-10, los valores piezométricos son predominantemente negativos, a excepción de los más retirados de las explotaciones (los antiguos piezómetros P-4 y P-6, los nuevos P-20 y P-21 y las dos captaciones de particulares P-30 y P-31). Las cotas están comprendidas entre 0,75 m s.n.m., en el P-30 y -23,4, en el DI-12; no consideramos la del P-31, ya que es anormalmente elevada (8,3 m s.n.m.) en relación con todas las demás, por las razones ya apuntadas.

4º) Los gradientes son mayores cuanto más nos aproximemos a las zonas de captaciones de la DA-I y están comprendidos entre el 2,7 por mil, en la zona entre P-30 y P-19 y un 21 %, entre DI-4 y DI-12.

5º) Entre los sondeos P-31 y P-30 hay un gradiente de 0,58 %, que contrasta con el 0,25 % (más del doble) existente entre el P-30 y el P-19; ello es debido a un cambio brusco de permeabilidad del medio, haciéndose menos permeable hacia el oeste.

Como conclusión general, observando la evolución piezométrica, desde el inicio del control periódico, se aprecia que el acuífero es muy sensible a cualquier agente, natural o antrópico, que actúe sobre el mismo, bien sea la lluvia, extracciones o riegos; ello es debido a que las dimensiones del mismo son relativamente pequeñas, confirmandose que los límites están bien establecidos.

7.5.5. MAPAS DE ISOVARIACIONES PIEZOMÉTRICAS

En las figuras 7.24 y 7.25, se puede ver las variaciones de profundidad del nivel piezométrico entre los periodos marzo de 2008 y enero de 2009; enero de 2009 y enero de 2010; enero de 2010 y julio de 2010; julio de 2010 y enero de 2011.

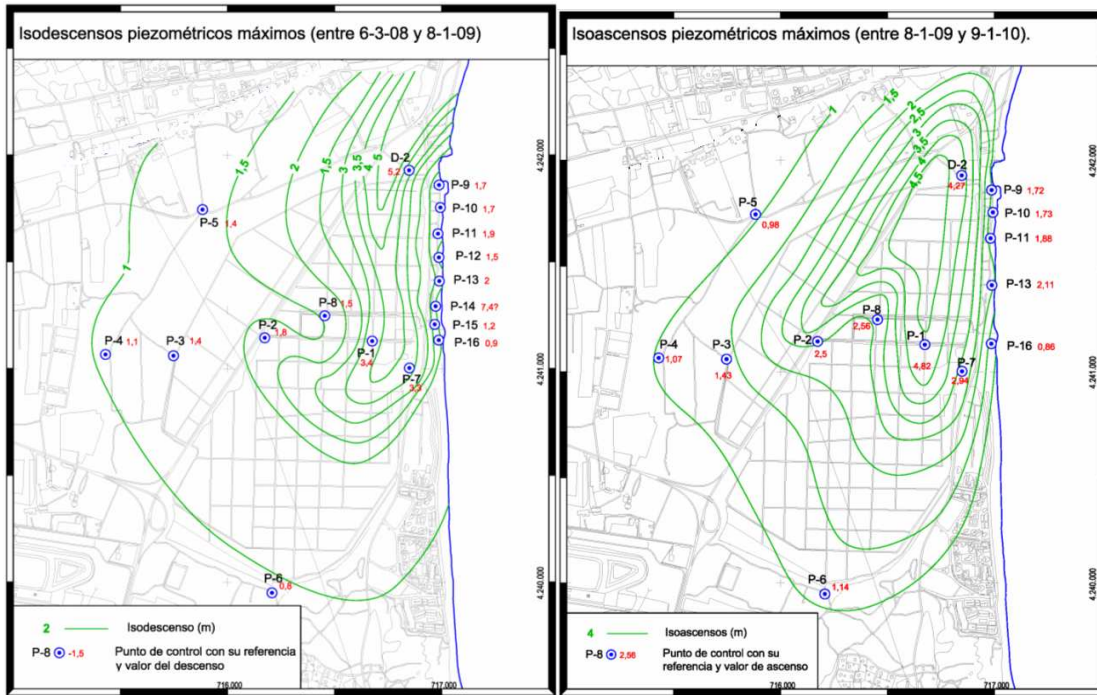


Figura 7.24. Mapa de isodescensos correspondiente al periodo 03-08/01-09 (izquierda) y 1-09/1-10 (derecha)

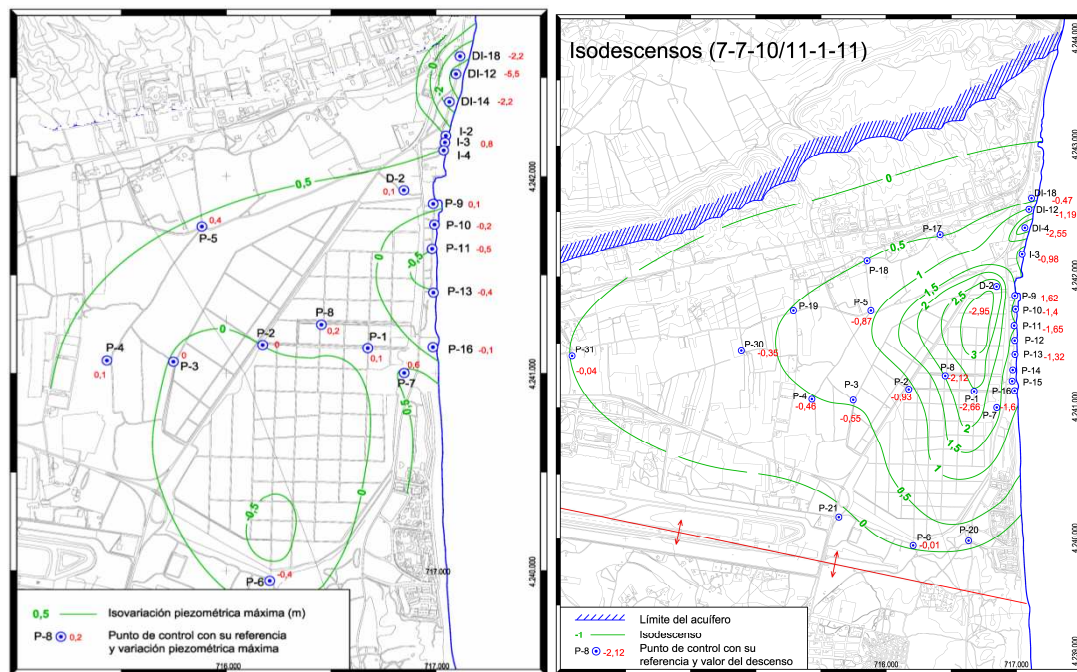


Figura 7.25. Mapa de isovariaciones piezométricas correspondiente al periodo 1-10 / 7-10 (izquierda) y 7-10 / 1-11 (derecha)

En el mapa correspondiente a isovariaciones entre marzo de 2008 y enero de 2009 se aprecia un descenso generalizado de los niveles piezométricos, debido a la entrada en funcionamiento del túnel de la DA-II, en julio de 2008. El descenso es más acusado bajo la

superficie del saladar, donde se sitúa el eje de drenaje, con valores que oscilan desde 1,5 m, en la parte sur, a 5,0 m en la parte norte, cerca de los pozos de extracción de la DA-I.

En el mapa correspondiente a enero de 2009 y enero de 2010 se advierte la recuperación general de los niveles piezométricos con motivo del comienzo del programa de vertidos sobre la superficie del saladar a mediados de diciembre de 2009. Los mayores ascensos se sitúan en la parte norte del saladar y en torno al eje de drenaje de dirección norte-sur.

En el mapa que se refiere al periodo comprendido entre enero de 2010 y julio de 2010 se observa que no ha habido variaciones piezométricas importantes entre las medidas de enero y julio de 2010, ya que durante esta etapa se continuó con el programa de vertidos y disminuyó la demanda de agua de la DA-II.

Por último, en el mapa correspondiente al periodo julio de 2010 y enero de 2011 se advierte lo siguiente:

- Los mayores descensos registrados se encuentran ligados a las captaciones de la DA-I (2,55 m en el DI-4), pero sobre todo a las de la DA-II (2,95 en el D-2), pues estos piezómetros han sido más sensibles al cese de los riegos.

- Se observan dos ejes, donde se localizan los mayores descensos, de dirección casi N-S y W-E, que están relacionados con las explotaciones de las desaladoras.

7.6. CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA

7.6.1. ASPECTO TEÓRICOS

El carácter hidroquímico más relevante de las aguas subterráneas del entorno del saladar es su elevada salinidad, hasta el punto que las hace inutilizables para usos convencionales como el consumo humano (2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C como máximo tolerable, según el real decreto 140/2003 del 7 del febrero) y la agricultura (restricciones importantes a partir de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Porta et al. (1999)). Las conductividades eléctricas en la zona de estudio oscilan entre 6000-15000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para las aguas continentales (facies clorurada a sulfatada sódica); 50000-60000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para el agua del túnel; 55000-65000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para el agua de los pozos de captación de la DA-I y valores iguales o superiores a 60000 para el acuífero profundo; y muy superiores a los 60000 (se han llegado a medir valores de hasta 310000 en el P-8, el 9-1-10) en el saladar.

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución para permitir el paso de la corriente eléctrica a través de ella. Se mide como la conductividad existente entre dos

electrodos de 1 cm² de superficie cada uno, separados 1 cm y sumergidos en el medio, Custodio y Llamas (1983). Su valor es función de la concentración y de la temperatura. Para una temperatura constante, en el Capítulo 8 se dan relaciones de dependencia entre la concentración y la conductividad eléctrica de diferentes autores, además de la expresión utilizada anteriormente de Holzbecher (1998). La figura 7.26 ilustra una relación lineal entre valores de concentración de cloruro y conductividad eléctrica de las muestras estudiadas.

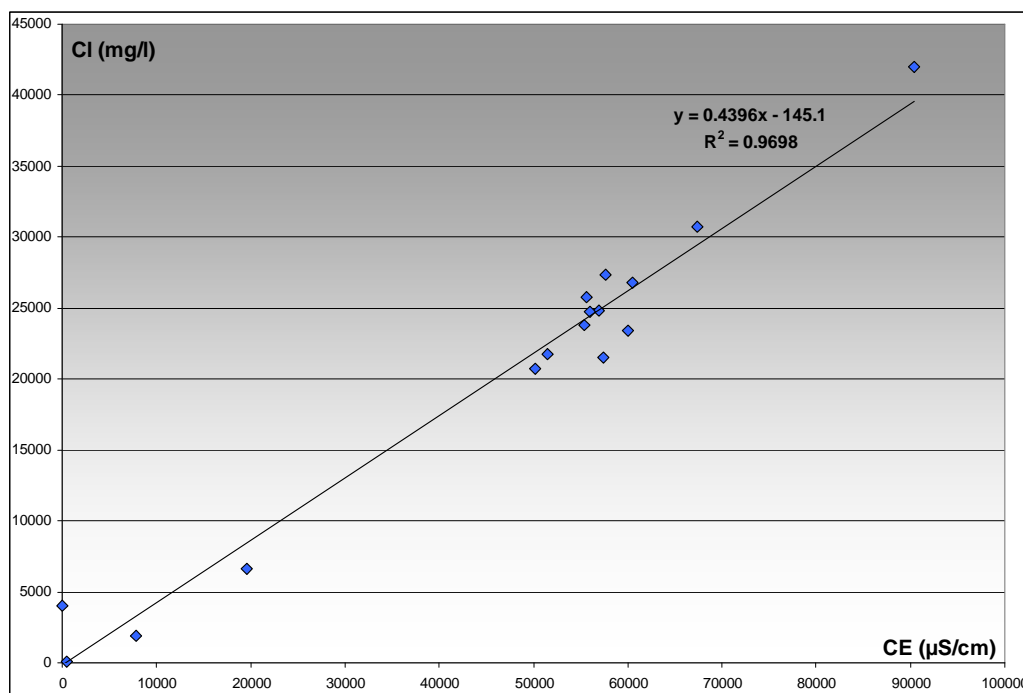


Figura 7.26. Ajuste lineal entre la concentración de iones cloruro (mg/l) y la conductividad eléctrica de las muestras de agua estudiadas

La composición química del agua determina la velocidad de migración de los iones, que a su vez influye en la conductividad eléctrica. El comportamiento químico-físico de cada ión queda establecido por su carga eléctrica, su radio iónico y el grado de solvatación (definido por la relación entre el radio del anión y del catión que forman la molécula), Barrow (1972). Así, para la caracterización de las aguas a partir de la conductividad eléctrica se ha de tener en cuenta la posible existencia de distintas fuentes de contaminación que pudieran alterar las relaciones iónicas.

Respecto a la variación de la conductividad eléctrica con la temperatura, se puede considerar que existe un aumento de la primera en torno al 2% por cada grado de temperatura, Custodio y Llamas (1983). La sonda con la que se efectuaron las medidas en el campo, marca Solinst modelo TCL, corrige los valores de conductividad eléctrica y los traduce a un equivalente de 25 °C de temperatura.

La salinidad que puede alcanzar un agua subterránea depende del tiempo de contacto entre la misma y el medio acuífero que aporta la sal. La velocidad del agua, y en consecuencia el tiempo de contacto de ésta con el terreno salino, está controlada a su vez por los parámetros hidráulicos del medio (porosidad y conductividad hidráulica) y por la densidad del fluido que determina las fuerzas de flotación. La explicación de la elevada concentración en sales de las aguas de algunos piezómetros del saladar (P-1 y P-8) en comparación con piezómetros colindantes puede justificarse por el hecho de que, debido a la escasa renovación condicionada por la baja conductividad hidráulica (el agua en los piezómetros referidos permanece semiestancada), la interacción entre el medio acuoso y el terreno (que presenta cristales de sal) dispone de tiempo suficiente para alcanzar un pseudoequilibrio desplazado hacia concentraciones elevadas.

La disminución de la conductividad hidráulica, en torno a algunos piezómetros, puede responder bien a la distribución heterogénea de este parámetro en el acuífero Cuaternario, o bien a las características constructivas de la perforación, que en ocasiones causan cierto nivel de impermeabilización en las paredes del sondeo. Con todo, las medidas de salinidad de los piezómetros P-1 y P-8, pueden no ser representativas de las características del agua que circula por el acuífero, que lo realiza a través de canales preferenciales de flujo creados por la heterogeneidad litológica y la presencia de fracturas, de forma que no llega a alcanzar concentraciones tan elevadas como las que se dan en los piezómetros P-8 y P-1.

7.6.2. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD

Desde el año 2000, en el que se inició la etapa de investigación del acuífero costero de Agua Amarga, y hasta el 2008, se dispone de registros de conductividad eléctrica de las aguas subterráneas, correspondientes a campañas de control ocasionales y ensayos de bombeo. Sin embargo es a partir de mayo del 2008 cuando la UPCT (para la MCT) comenzó el control mensual de piezometría, calidad química y temperatura del acuífero. En este apartado se expone y se comenta la información disponible, así como las conclusiones que de ella se derivan.

7.6.2.1. Registros DA-I

i) Registros previos a la puesta en marcha: años 2000 a 2002

Antes de la puesta en marcha de las captaciones para el abastecimiento de la DA-I, se llevaron a cabo ensayos de bombeo en algunos pozos de captación, y en otros perforados durante la etapa de investigación. Los registros químicos tomados durante dichos ensayos se recogen en el Anexo 5 y están resumidos en la tabla 7.4.

Pozo	Fecha	c.e. (mS/cm)	Profundidad de la obra (m)
I-3	dic-2000	80-100 (a 20°)	150
P-3	ago-2001	40-53 (a 20°)	50
P-1	ago-2001	52-56 (a 20°)	50
P-2	ago-2001	55-57 (a 20°)	50
P-4, 5, 13, 15 y 17	jun/jul-2002	51-56 (a 20°)	50
P-7, 8, 10, 11 y 12	jun/jul-2002	56-62 (a 20°)	50
Mar		55 (a 18°)	

Se ha mantenido la nomenclatura original de los pozos pertenecientes a la DA-I, a pesar de que la de alguno de ellos coincide con la de los piezómetros de la DA-II; ello es debido a que la documentación suministrada por dicha desaladora responde a esas referencias. En cualquier caso, se cree que no existirá confusión posible, ya que en cada uno de los temas tratados en la tesis se ha diferenciado entre DA-I y DA-II, y entre pozos y piezómetros respectivamente.

Tabla 7.4. Conductividad eléctrica de las muestras tomadas durante los ensayos de bombeo en pozos de abastecimientos de la DA-I y en sondeos de investigación

De estos resultados se puede establecer las siguientes consideraciones:

- El rango de variación de los valores de conductividad eléctrica es semejante al del agua de mar o se encuentra por encima.
- El pozo de mayor profundidad (I-3) es el que presenta los valores más elevados de conductividad eléctrica.
- Durante los ensayos de bombeo en los pozos P-1, P-2, P-3 y I-3, se constató que a mayores caudales extraídos o tiempos de bombeo, se producía un aumento en la conductividad eléctrica del agua bombeada (Anexo 5),
- En los datos tomados durante los ensayos de bombeo (informes internos de la MCT realizados por PERFIBESA S.A.) se observa cómo los niveles piezométricos tienden a estabilizarse en cada escalón, alcanzándose prácticamente en algunos de ellos el régimen permanente. Esto es lo que sucede cuando existe un borde de piezometría constante o fuente inagotable de agua (el mar). Se puede concluir que, dado que existe una conexión clara entre el acuífero y el mar, las aguas procedentes del continente son las que determinan los valores de conductividad eléctrica por encima de los valores del agua de mar.

ii) Registros en los pozos de abastecimiento: años 2003 a 2010

En la figura 7.27 se muestra un gráfico con la evolución de la conductividad eléctrica de los pozos de extracción P-8 y P-14 (50 m de profundidad), P-19 (100 m) y P-26 (150 m), así como la conductividad eléctrica del agua de mar.

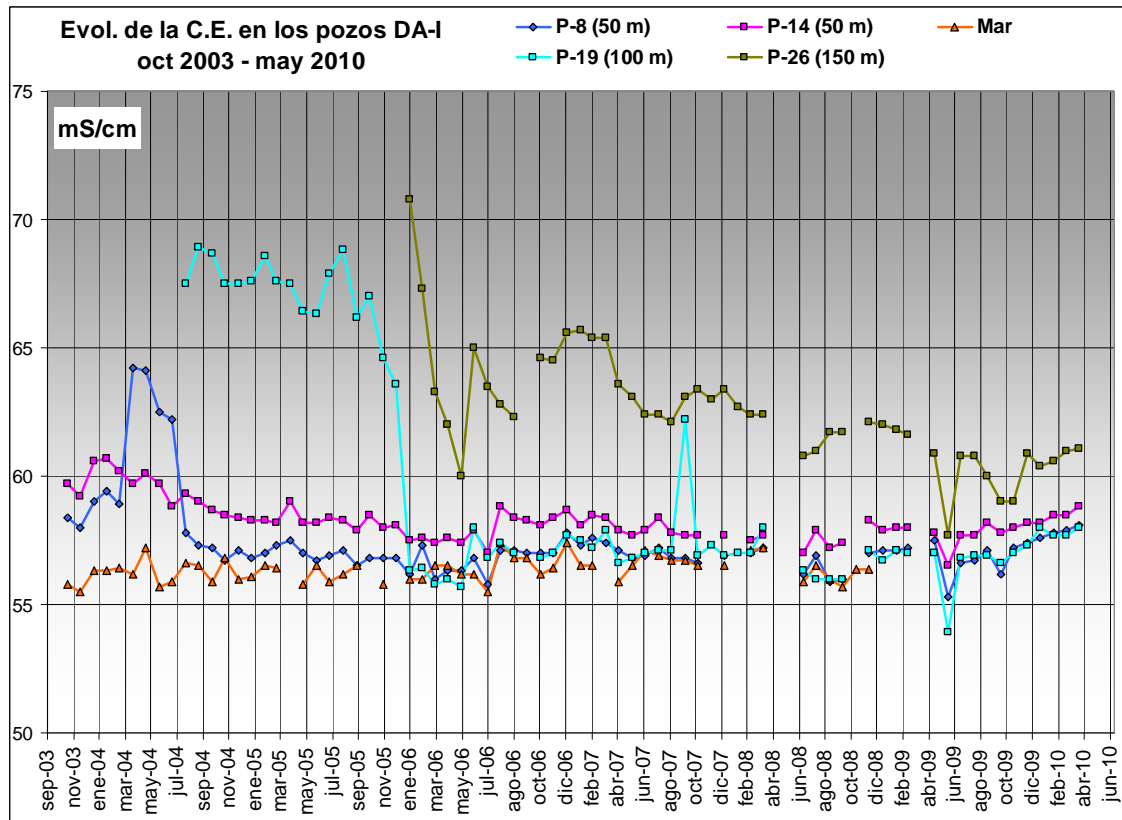


Figura 7.27. Evolución de la conductividad eléctrica del agua de mar y de los pozos de extracción P-8, 14, 19 y 26 de la DA-I

Se pueden extraer así mismo varias conclusiones:

- La conductividad eléctrica del agua de los pozos de extracción disminuye conforme aumenta el tiempo de funcionamiento de éstos y después se tiende a la estabilización.
- Los valores iniciales de conductividad eléctrica son mayores conforme el agua extraída es más profunda.
- Los valores de conductividad eléctrica se sitúan siempre por encima de los valores del agua de mar, por lo que la componente de aguas continentales en las aguas captadas está influenciada por la salinidad de los suelos del saladar.
- El leve aumento en la conductividad eléctrica que se produce a partir de octubre de 2009 debe estar condicionado por el aumento de las lluvias desde septiembre y consecuente disminución en las extracciones. Probablemente este fenómeno sea debido a que se produce una recarga de agua de lluvia en el acuífero superior y muy posiblemente también en el inferior del Messiniense, más salado.
- El comportamiento de los pozos de 100 m de profundidad es similar a los de 50 m, ya que las rejillas se encuentran situadas a partir de los 20 m, permitiendo la captación de aguas del acuífero superior y del mar. El comportamiento en los pozos de 150 m es

diferente, puesto que se encuentran sellados los primeros 50 m, estando por tanto aislados del acuífero superior.

En la figura 7.28 se muestra un gráfico de valores de conductividad eléctrica y temperatura tomada en julio de 2009 en algunos de los pozos de extracción.

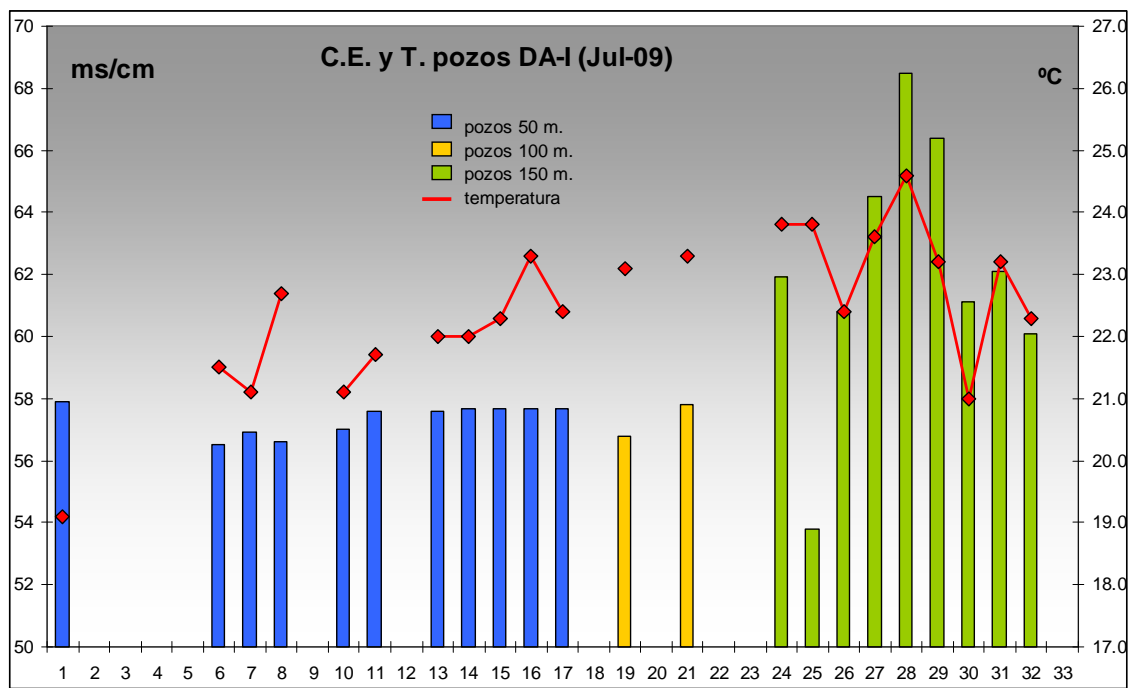


Figura 7.28. Valores de conductividad eléctrica y temperatura de algunos de los pozos de extracción de la DA-I (Julio de 2009)

De la figura anterior pueden hacerse las siguientes observaciones:

- Los pozos de 150 m presentan valores de conductividad eléctrica mayores.
- Los pozos de 100 m presentan valores similares en conductividad eléctrica a los de 50 m.
- La disparidad de valores en los pozos de 150 m se atribuye a la variación espacial de la conductividad hidráulica, condicionada por las características del medio geológico, especialmente la presencia de fracturas. La naturaleza del agua en estas captaciones, está determinada por la mezcla entre aguas superficiales y profundas (P-30), de componente superficial predominante (P-25) o con predominio de la componente de aguas más profundas (P-28).

iii) Registros en el agua de la cántara de almacenamiento: años 2004-2010

La cántara de almacenamiento es el lugar donde se recogen las aguas procedentes del conjunto de pozos de extracción. Por tanto contiene una mezcla de agua de mar y aguas continentales profundas y superficiales. En la figura 7.29 se ha representado la evolución temporal de los valores de conductividad eléctrica del agua de mar y del agua de la cántara.

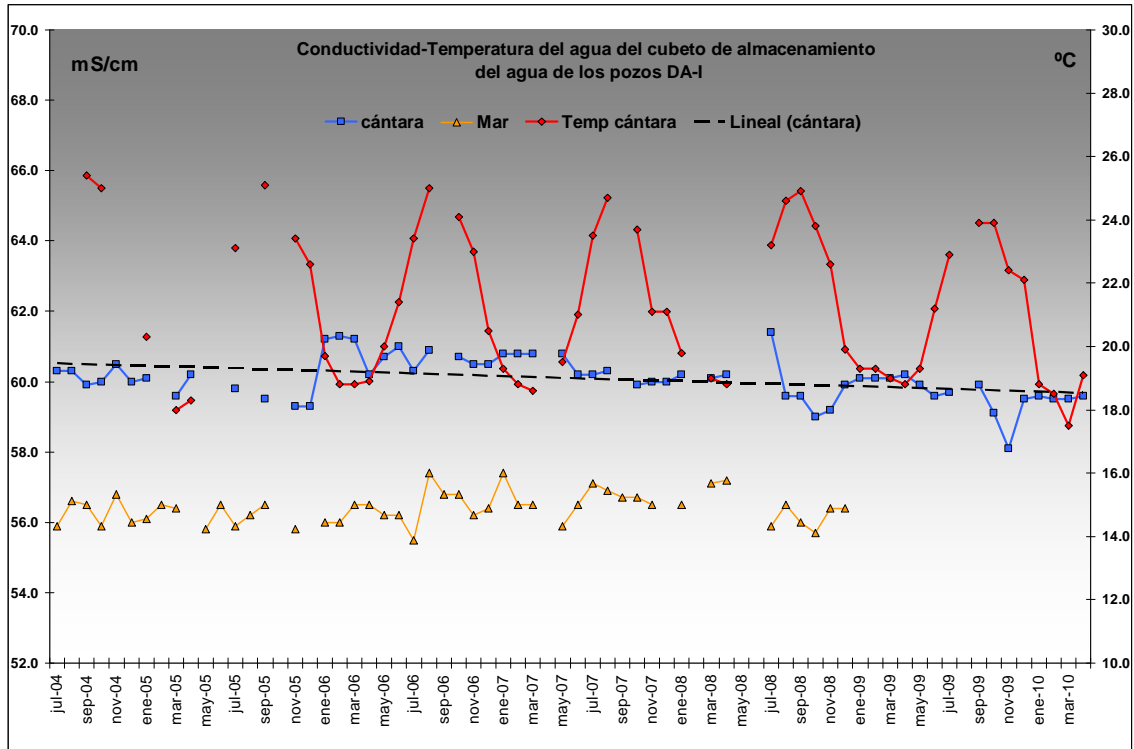


Figura 7.29. Evolución de la conductividad (mS/cm) y de la temperatura del agua en la cántara de recepción de agua procedente de los pozos de extracción de la desaladora DA-I, para el periodo julio 2004/diciembre 2010

Caben las siguientes consideraciones:

- Existe una tendencia general muy leve a la disminución de la conductividad eléctrica con el tiempo, lo cual es coherente con los datos del estudio individual de los pozos.
- Los valores de conductividad eléctrica se sitúan siempre por encima de los valores del agua de mar, por lo que la componente de aguas continentales en las aguas captadas está influenciada por las sales presentes bajo el saladar.

7.6.2.2. Registros DA-II

iv) Registros previos a la puesta en marcha: años 2003 y 2004

En el marco del proyecto de investigación geológica para la ampliación de la DA-II, se llevaron a cabo varias campañas de SEDT (Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo) en diciembre de 2003, otra de testificación geofísica de los sondeos geotécnicos S-1/S-12 y D-1 y D-2 en junio de 2004, y otra de ensayos de bombeo en algunos de los pozos y sondeos de control realizados para la ocasión. La zona estudiada comprende básicamente el espacio ubicado entre la línea de costa y el Saladar de Agua Amarga, desde el norte del mismo hasta el sur de Urbanova, el propio saladar y algunos puntos situados en el entorno de éste. La información queda recogida en el informe MCT-MMA y U.T.E (2005).

En la campaña de SEDT de la zona del saladar se detectó una capa de sal muy superficial y salmueras a partir de los 15-20 metros de profundidad. Estas últimas también fueron detectadas en la campaña de testificación, figura 7.30.

Los sondeos realizados durante esta investigación se ubicaron en la línea de costa, salvo los S-11 y S-12 que se encuentran retirados de ella a 600 y 1200 m, respectivamente. Los sondeos de S-1 a S-6 se realizaron sobre la traza del entonces proyecto de túnel de la DA-II, entre el saladar y la línea de costa. Los demás se encuentran al sur de Urbanova. Los sondeos D-1 y D-2 (actual piezómetro denominado D-2) se encuentran entre el Saladar y los pozos de bombeo de la DA-I. Las coordenadas de estos sondeos se encuentran en el Anexo 2.

De los resultados de esta investigación se dedujo la presencia de aguas saladas de conductividades eléctricas menores o próximas a las del agua de mar hasta profundidades en torno a 25 m. A partir de esta profundidad se detecta en 5 sondeos (3 de ellos situados en el saladar) la presencia de agua salada con conductividad del orden de 58 mS/cm o mayor. Por otra parte, en los ensayos de bombeo realizados en pozos de 30 m junto al saladar se observó que, al igual que lo que ocurrió durante la etapa de investigación de la DA-I, los valores de conductividad eléctrica aumentaron conforme era mayor el caudal de los escalones y también con el transcurso del tiempo de duración del ensayo. La conductividad eléctrica osciló entre 48 y 68 ms/cm.

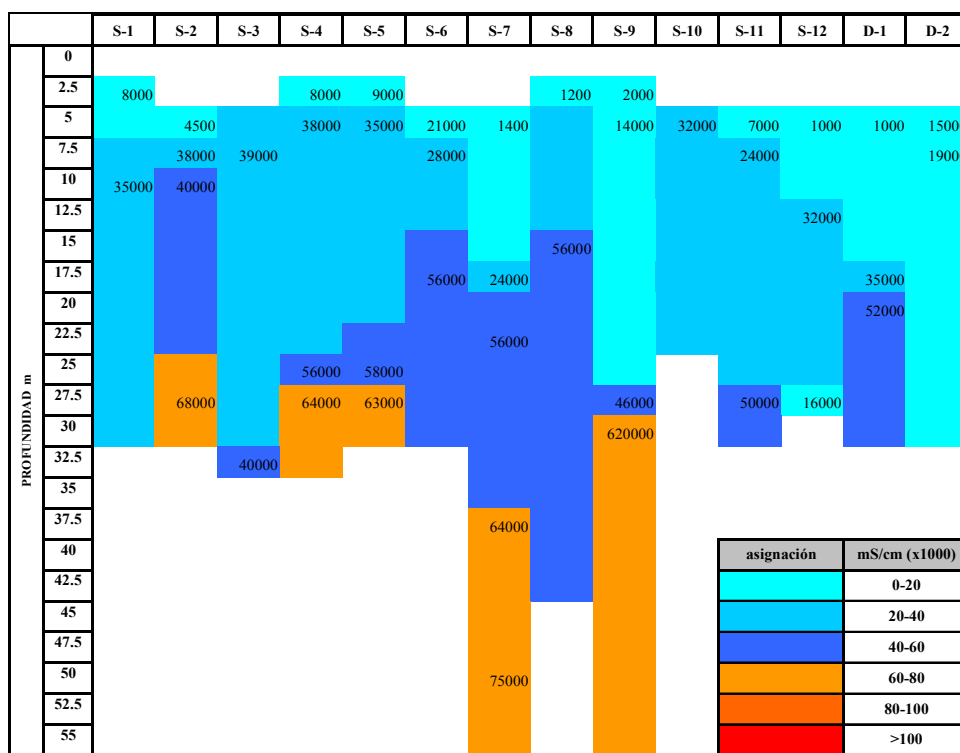


Figura 7.30. Esquema representativo de los valores de conductividad eléctrica obtenidos en la testificación de sondeos de investigación geotécnica realizados en el marco del proyecto de ampliación de la DA-I. Las medidas se realizaron en junio de 2004 (la situación de los sondeos puede verse en el mapa de isopiezas del año 2004, figura 7.9)

v) Registros en el agua de la cántara de almacenamiento, años 2009 y 2010

La cántara de almacenamiento recoge las aguas procedentes de las 11 Perforaciones Horizontales Dirigidas (PHD), de los sondeos de drenaje construidos en el interior del túnel (104 pozos inclinados) y de las bocas situadas en los extremos del mismo (8 pozos inclinados), que detraen agua del continente y del mar. Todas las perforaciones referidas captan sólo calcarenitas del Tirreniense; sin embargo las aguas de la cántara también contienen aguas continentales, ya que dichas rocas carbonatadas están en contacto lateral con los materiales permeables de la Formación Sucina.

La evolución temporal de la conductividad eléctrica del agua almacenada en la cántara se ilustra en la figura 7.31; de su observación se puede concluir que los valores de conductividad eléctrica se sitúan ligeramente por encima de los del agua de mar (en torno a 56 mS/cm), dejando constancia de la influencia que ejerce la salinidad bajo el saladar en las aguas subterráneas continentales. Los valores más altos de extracción (julio, agosto, septiembre y noviembre de 2009) coinciden con los valores de conductividad eléctrica más bajos registrados, lo cual se asocia a la entrada de agua de mar hacia las captaciones (posible aumento en las captaciones de las PHD). A partir de diciembre del 2009 disminuyen las extracciones de la desaladora, que está acompañada de un incremento de la conductividad eléctrica. Este incremento se asocia a que, probablemente, el caudal extraído para la desaladora provenga esencialmente del drenaje de las perforaciones inclinadas del túnel (que se encuentran ligadas al saladar y a sus aguas salinas) y no de las PHD que en este periodo estarías inactivas, por su mayor coste económico.

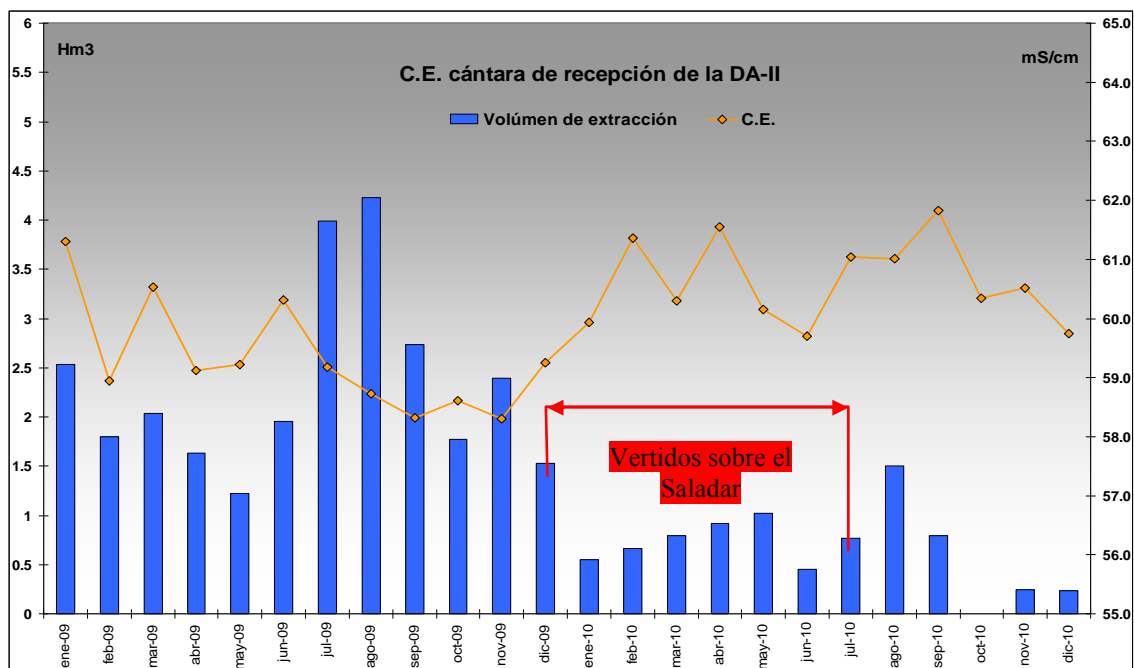


Figura 7.31. Evolución temporal de la conductividad eléctrica del agua de la cántara de almacenamiento de la DA-II y volúmenes de extracción

7.6.2.3. Registros en la zona del saladar y alrededores, años 2008 a 2010

En el Anexo 6 se muestran las tablas de evolución temporal y en profundidad de la conductividad eléctrica en los piezómetros de la red durante el periodo mayo de 2008 a enero de 2011. Se efectuó un registro de medidas cada metro de profundidad, a partir del nivel piezométrico. Para el estudio de la conductividad eléctrica, se ha subdividido la zona en: oeste del saladar, saladar, línea de costa, piezómetros junto a la DA-I y pozos alejados del saladar.

vi) Registros en la zona oeste del saladar

Para el caso de los piezómetros situados en la zona oeste del saladar (P-2, P-3, P-4, P-5 y P-6), Anexo 6, cabe destacar lo siguiente:

- Los valores de conductividad eléctrica oscilan entre 0 y 20 mS/cm (P-4, P-5 y P-6), que son los más alejados del saladar, y entre 10 y 50 mS/cm (P-2 y P-3), que se encuentran más próximos al saladar.
- Se aprecia un aumento de conductividad eléctrica con la profundidad, que responde a una estratificación por gravedad (figura 7.32). Las aguas dulces, procedentes de la recarga de lluvia, contribuyen a la disminución de la salinidad del agua más superficial. El salto en los valores de conductividad eléctrica se produce entre 10 y 12 m de profundidad.
- En los piezómetros P-2 y P-3, se produce un aumento de conductividad eléctrica de la columna de agua a partir de septiembre de 2009. Este aumento coincide con los valores más altos de lluvias registrados durante el periodo de medidas. Este fenómeno cabe interpretarlo en términos de una aportación de agua desde el acuífero inferior, de salinidad superior (pozos profundos en las figuras 7.27 y 7.28), cuya piezometría puede haber aumentado por el efecto de las propias lluvias.
- Desde enero de 2010 (a partir de abril de 2010 en el P-2), se produce una disminución de la conductividad eléctrica en la columna de agua, causada por los vertidos sobre el saladar, que actúan como barrera sobre el flujo de agua dulce procedente del continente (figuras 7.32 y 7.33).

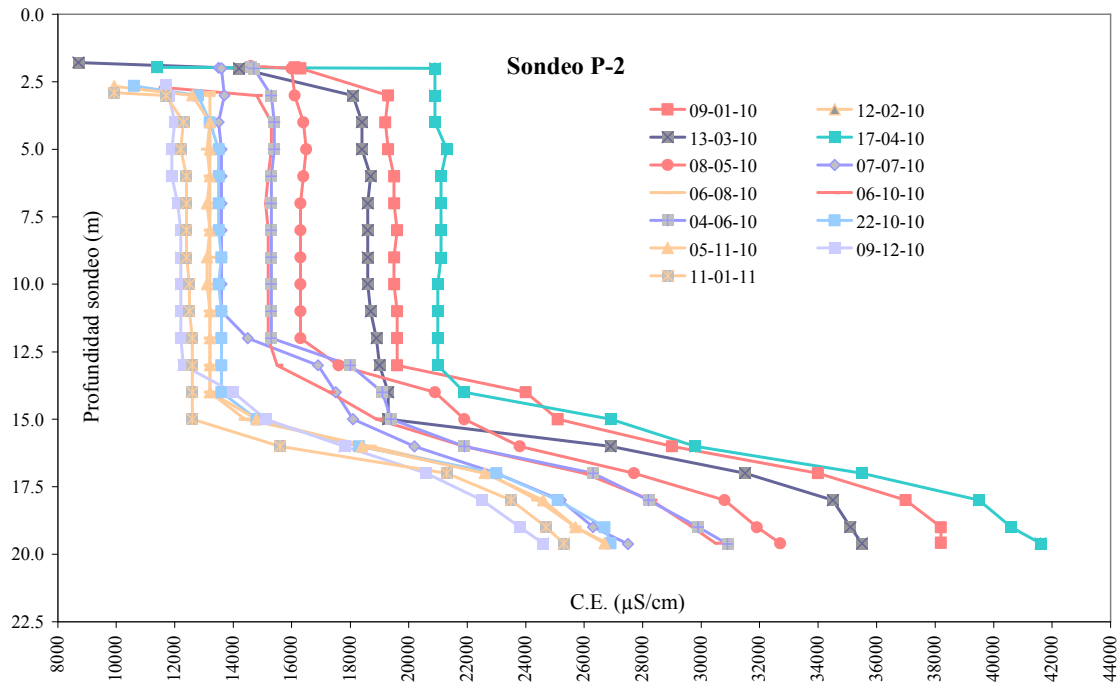


Figura 7.32. Evolución de la conductividad eléctrica en profundidad en el piezómetro P-6

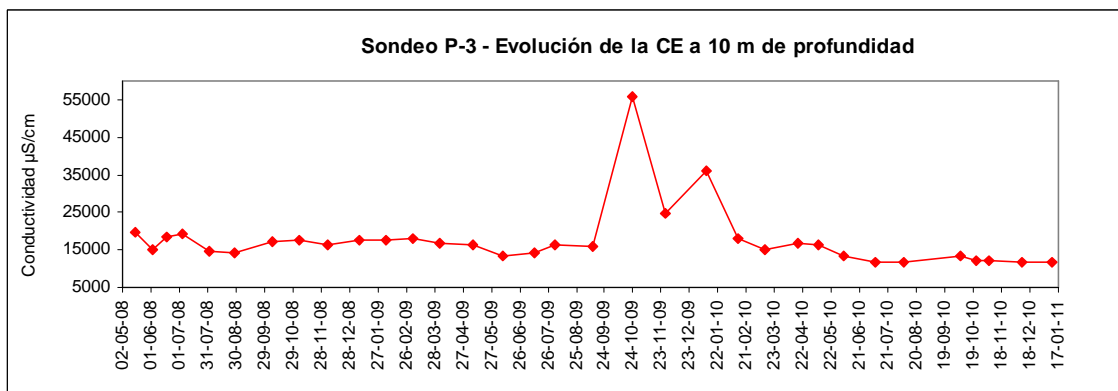


Figura 7.33. Evolución de la conductividad eléctrica a 10 m de profundidad en el piezómetro P-3

vii) Registros en el saladar

Para el caso de los piezómetros situados en el saladar (D-2, P-1 y P-8), Anexo 6, cabe destacar lo siguiente:

- La conductividad eléctrica varía entre 40 y 80 mS/cm en el D-2 (situado entre el saladar y las explotaciones de la DA-I) y valores superiores a 60, llegando a alcanzar los casi 400 mS/cm, en los piezómetros P-1 y P-8 (situados en el saladar).
- Se aprecia un aumento de conductividad eléctrica con la profundidad, que responde a una estratificación por gravedad (figura 7.34). El salto de conductividad a valores iguales o superiores de los del agua de mar, se produce en el primer metro de columna de agua.

- La lectura en el D-2, correspondiente a julio de 2004 (los primeros pozos de la DA-I se pusieron en funcionamiento en septiembre de 2003), informa sobre una situación de salinidad inicial en su entorno, ya que la baja permeabilidad del terreno no ha permitido que las aguas subterráneas procedentes del saladar alcancen este punto. En septiembre de 2007 (con 4 años de funcionamiento de la DA-I), la lectura de salinidad había aumentado apreciablemente, sin duda por el efecto de arrastre de las aguas del saladar hacia el cono de bombeo de la desaladora.
- Como en el caso de los piezómetros P-2 y P-3, se produce un aumento de conductividad eléctrica de la columna de agua en torno a septiembre-octubre de 2009, correspondiente con los valores más altos de lluvias.
- A partir de febrero de 2010 se observa una disminución progresiva de la conductividad eléctrica en los piezómetros P-1 y D-2, hacia valores próximos al agua de mar (figura 7.35). En el piezómetro P-8 la tendencia es mucho menos acentuada, situándose los valores aún por encima de los 100 mS/cm. La disminución registrada en todos se explica por el efecto de los vertidos con agua de mar sobre la superficie del saladar.
- Los valores de conductividad eléctrica alcanzados en el agua del piezómetro P-8 (figura 7.34) pueden responder, más que a la salinidad del agua del acuífero, a procesos de equilibrio entre los cristales de sal presentes en el terreno y el agua contenida en el piezómetro, como se ha mencionado con anterioridad. De hecho, en P-8 es donde menos se ha notado (a nivel hidroquímico) los vertidos sobre el saladar.

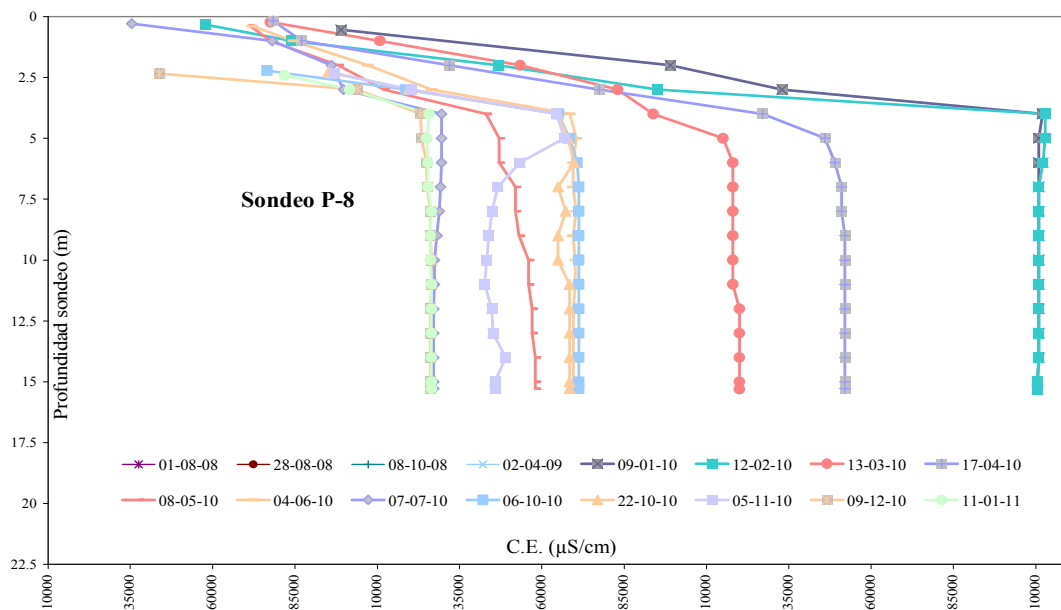


Figura 7.34. Evolución de la conductividad eléctrica en profundidad en el piezómetro P-8

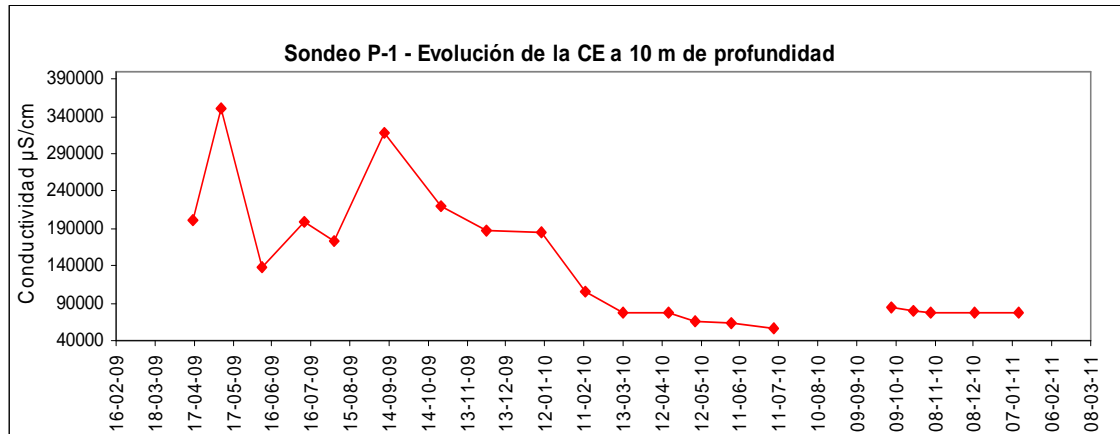


Figura 7.35. Evolución de la conductividad eléctrica a 10 m de profundidad en el piezómetro P-1

viii) Registros en la línea de costa

Para el caso de los piezómetros situados en la línea de costa (de P-9 a P-16 y P-7), Anexo 6, cabe destacar lo siguiente:

- Los valores de conductividad eléctrica se sitúan entre 40 y 80 mS/cm, resultado de la mezcla de agua de mar y agua continental afectada por el saladar. Los valores más extremos registrados se dan en el P-7 (de 20 a 100 mS/cm), que se encuentra más retirado de la costa que el resto, estando dichos valores condicionados tanto por las aguas continentales como por las propias del saladar.
- No se aprecian variaciones en profundidad de la conductividad eléctrica (figura 7.36), lo cual se explica por la buena comunicación con el agua de mar; a excepción del P-7, en el que sí se aprecia estratificación por su proximidad al saladar.
- Se observa una disminución de la conductividad eléctrica en todos los piezómetros a partir de enero-febrero del año 2010 (figura 7.37). Los valores se aproximan a los del agua de mar debido a la influencia de los vertidos sobre el saladar.
- En el P-7 se aprecia un aumento puntual de la conductividad eléctrica en mayo y uno más prolongado en septiembre-octubre del 2009, causado por la influencia de las abundantes lluvias en este periodo (como ya se explicó para los piezómetros P-2 y P-3). A partir de diciembre de 2009, los cambios en la salinidad están determinados por los vertidos con agua de mar sobre el saladar.

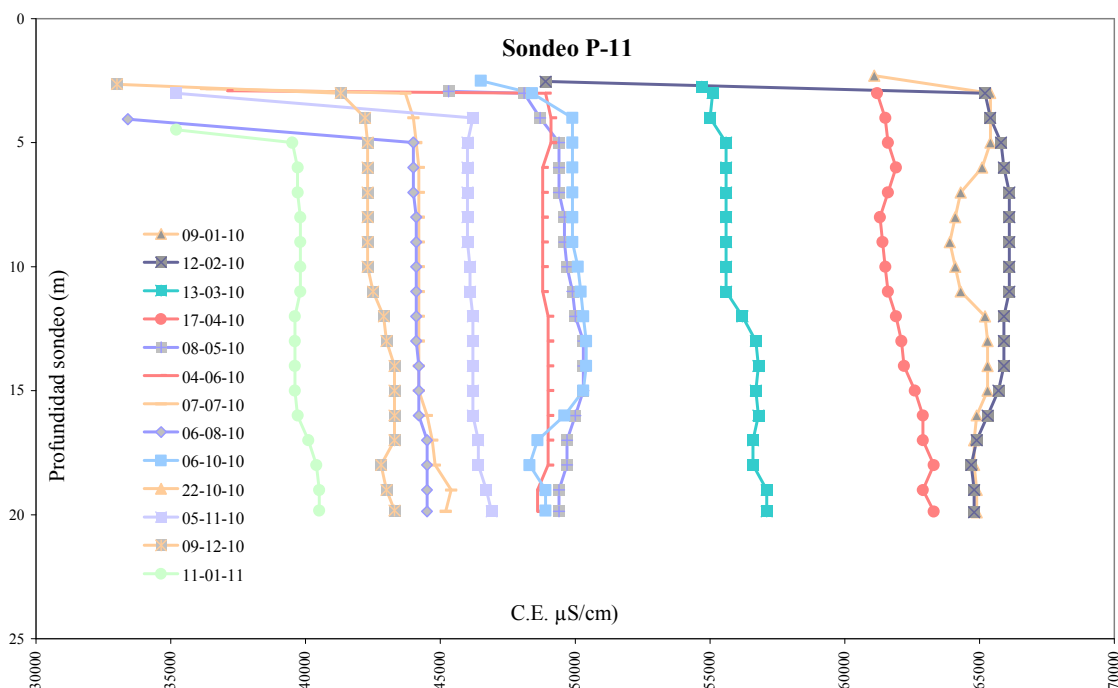


Figura 7.36. Evolución de la conductividad eléctrica en profundidad en el piezómetro P-11

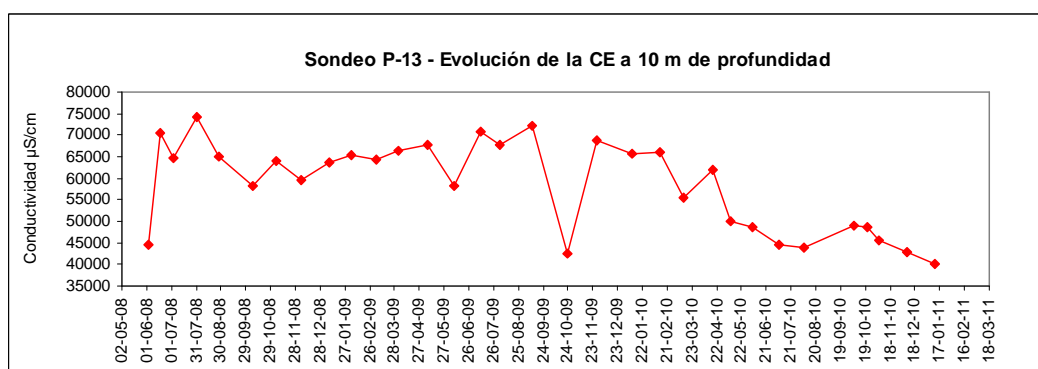


Figura 7.37. Evolución de la conductividad eléctrica a 10 m de profundidad en el piezómetro P-13

En el P-13 se observa que partir de la última fecha referida (diciembre de 2009), mientras que el nivel piezométrico se mantiene prácticamente constante, la conductividad descende hasta aproximarse a 40000 μ S/cm en enero de 2011 (prácticamente la misma que la del mar, en esta misma fecha), el registro más bajo obtenido desde que se iniciaron los controles periódicos. Aquí se ve, primero, la influencia directa de los riegos en la salinas: aumenta el nivel piezométrico por alimentación añadida, como ya se mencionó con anterioridad, y baja la conductividad por dilución. Luego, se observa una tendencia a la estabilización piezométrica, esto es, al nuevo equilibrio hidrodinámico. El descenso de conductividad producido a partir del 22-10-10 debe estar relacionado con la temperatura del mar, ya que a mayor temperatura existe mayor conductividad. En las figura 7.38 y 7.39 aparece la evolución de la conductividad y de la temperatura del mar.

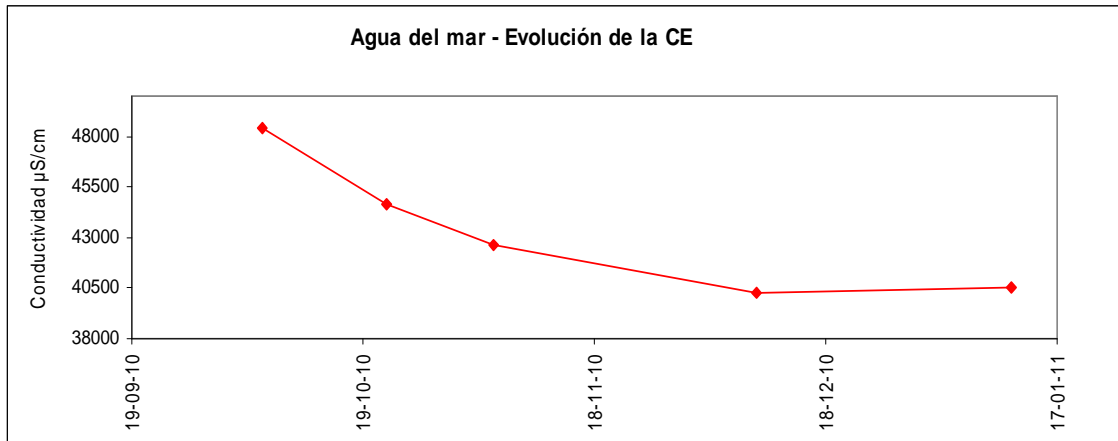


Figura 7.38. Evolución de la conductividad del agua del mar

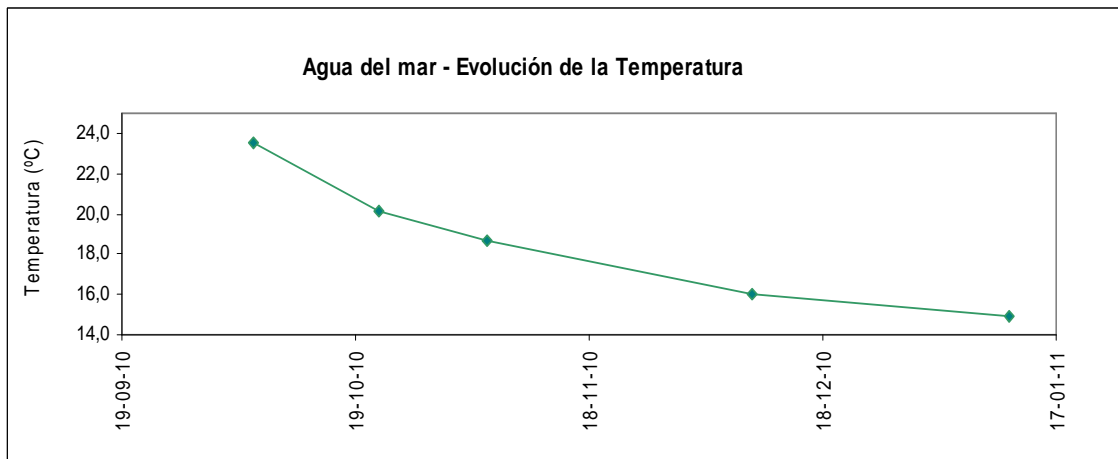


Figura 7.39. Evolución de la temperatura del agua del mar

ix) Registros en piezómetros junto a la DA-I

Desde febrero de 2010 se realizan registros de conductividad eléctrica en profundidad de algunos pozos de la DA-I que actualmente no se encuentran en uso; registros que se han incorporado a la red de control piezométrico. Las tablas de evolución temporal se encuentran en el Anexo 6. Cabe destacar lo siguiente:

- En la figura 7.40 se presenta la variación de conductividad eléctrica en profundidad del pozo DI-18. El agua se encuentra en circulación debido a la proximidad a los pozos de extracción de la DA-I, por lo que no hay estratificación. Esto motiva que las variaciones de conductividad eléctrica se encuentren estrechamente relacionadas con las que experimenta el agua que circula por el acuífero en torno a las captaciones (principalmente agua de mar), como ocurre con los piezómetros de la línea de costa (P-9 a P-16).

- La conductividad eléctrica disminuye con el tiempo, aunque los valores se sitúan próximos a los del agua de mar (figura 7.41). Esta disminución, puede estar relacionada con los vertidos sobre la superficie del saladar o con la tendencia general de los pozos de captación de la DA-I (figura 7.21). El periodo estudiado aún es muy corto para establecer conclusiones.

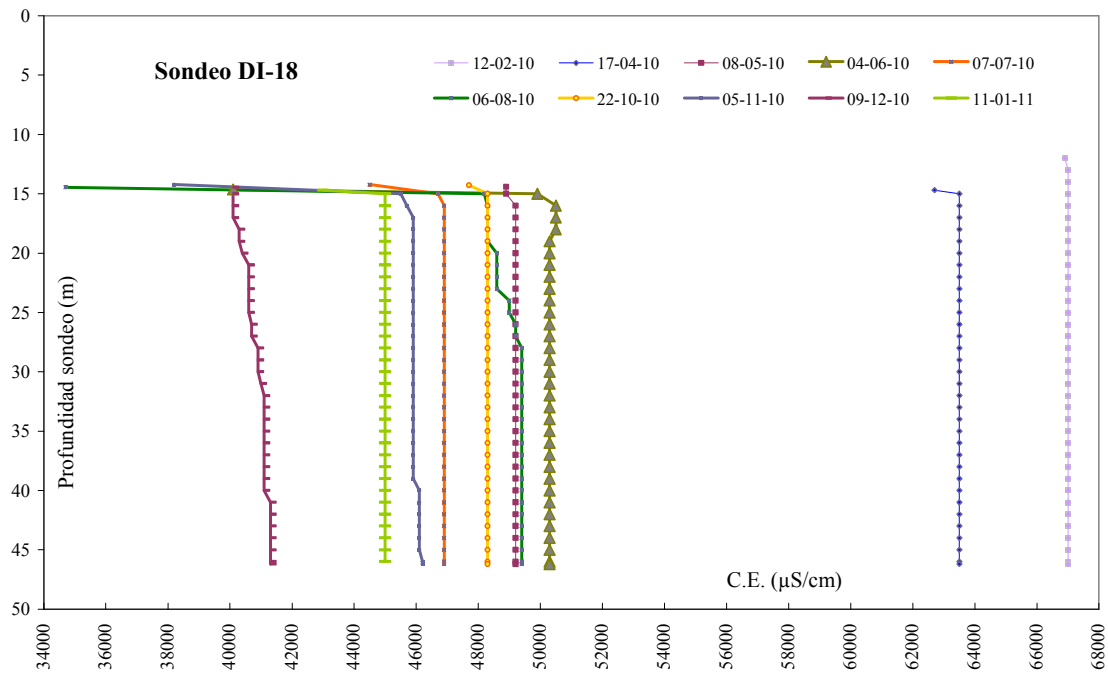


Figura 7.40. Evolución de la conductividad eléctrica en profundidad en el piezómetro DI-18

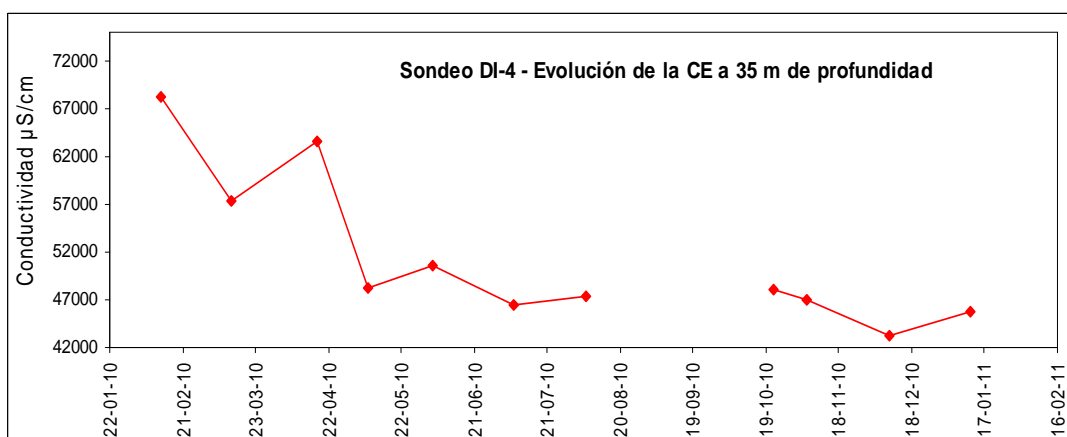


Figura 7.41. Evolución de la conductividad eléctrica a 35 m de profundidad en el piezómetro DI-4

x) Registros en pozos alejados del saladar.

Desde agosto de 2010 se toman lecturas de la conductividad eléctrica en superficie de los pozos P-30 y P-31 situados a más de 2 km al oeste del saladar. Los valores (figura 7.42) oscilan entre 5,5 y 9,0 mS/cm, característicos de las aguas subterráneas continentales de esta zona.

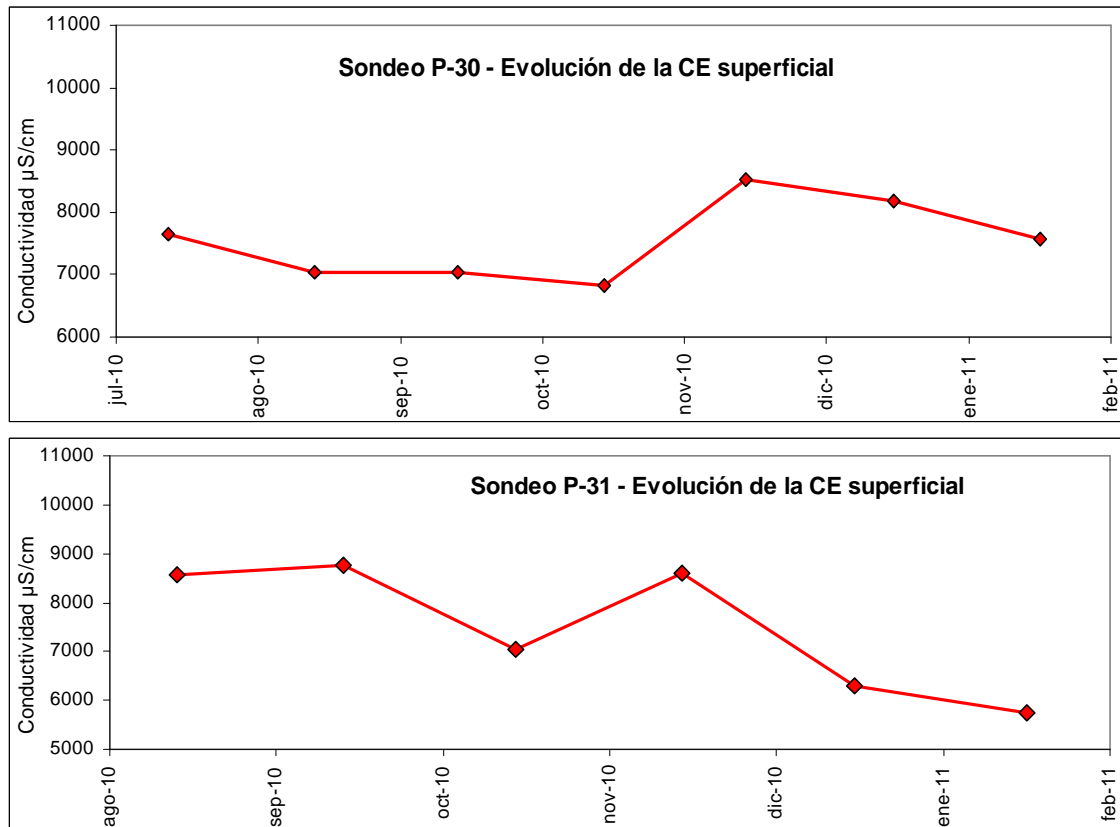


Figura 7.42. Evolución de la conductividad eléctrica en superficie de los pozos P-30 (arriba) y P-31 (abajo)

7.6.2.4. Mapas de isoconductividades en profundidad

Con la idea de sintetizar los resultados obtenidos durante las campañas de medición de la conductividad eléctrica, se realizaron varios mapas de isoconductividad con los valores registrados a 10 m de profundidad (figuras 7.43, 7.44 y 7.45).

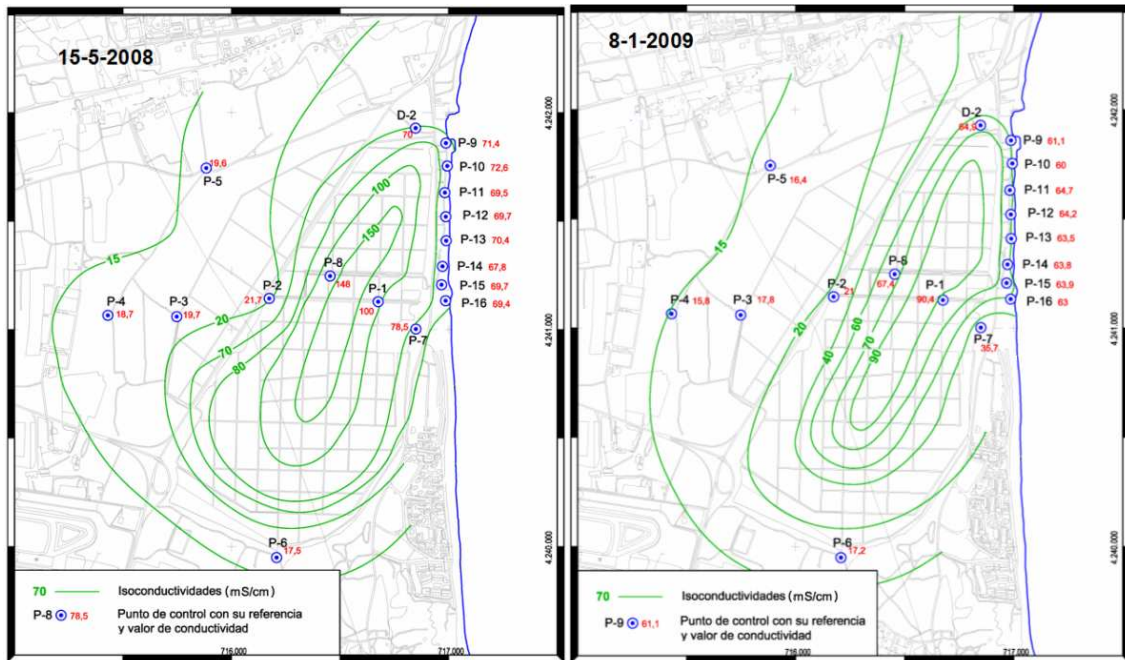


Figura 7.43. Isoconductividades a 10 m de profundidad el 15-5-08, antes del inicio de las extracciones en el túnel (izquierda). Isoconductividades a 10 m de profundidad el 8-1-09 después del inicio de las extracciones en el túnel (derecha)

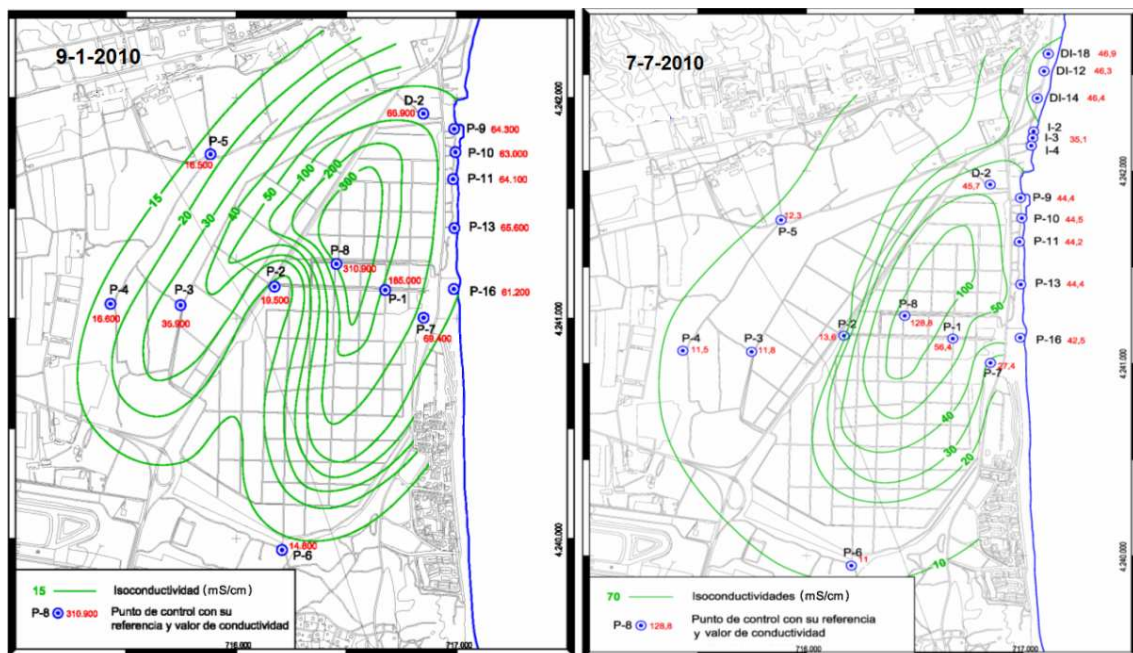


Figura 7.44. Isoconductividades a 10 m de profundidad el 9-01-2010, 15 días después del comienzo de los vertidos sobre el saladar (izquierda). Isoconductividades a 10 m de profundidad el 7-7-2010, 7 meses después del inicio de los vertidos sobre el saladar (derecha)

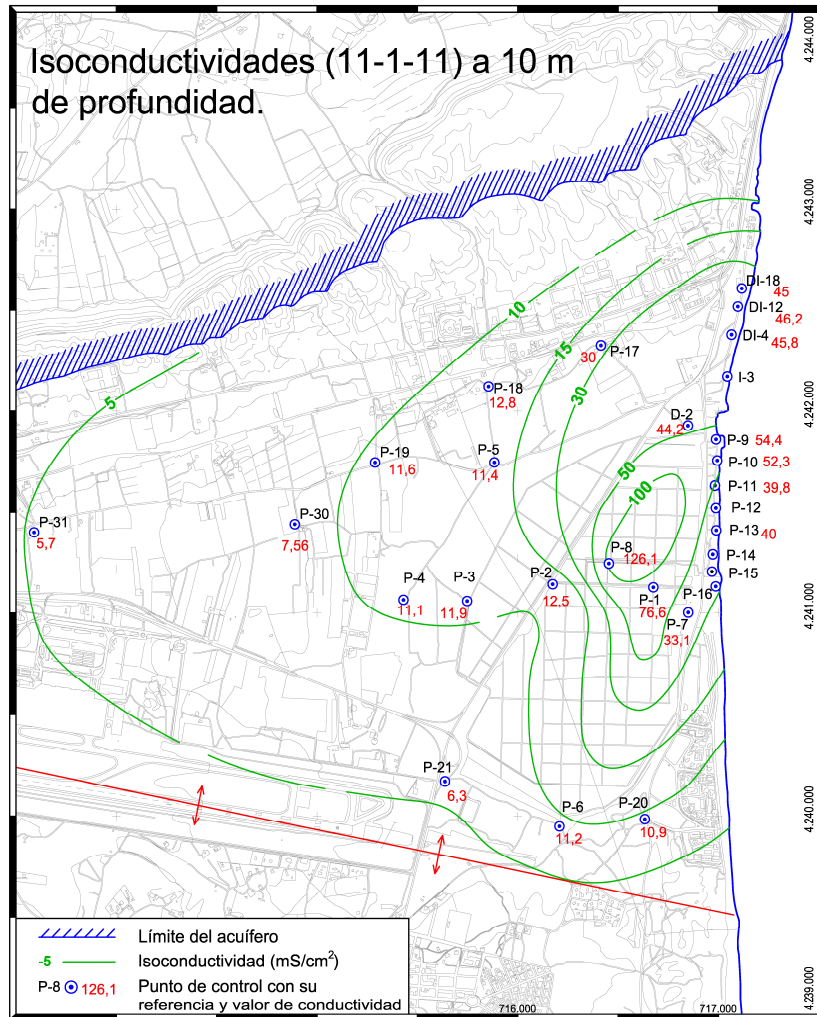


Figura 7.45. Isoconductividades a 10 m de profundidad el 11-1-11, 6 meses después del cese de los vertidos

Los valores más altos de conductividad eléctrica se dan bajo la parte central del saladar. Estos oscilan entre 90 y 300 mS/cm y disminuyen hacia el exterior, alcanzando valores entre 10 y 15 mS/cm en la curva que une los piezómetros P-5, P-4 y P-6. La línea de costa presenta valores entre 50 y 60 mS/cm, próximos a los del agua de mar. La disminución general de los valores entre las campañas de enero y julio de 2010 se atribuye al efecto de los vertidos con agua de mar.

Como se describió en la sección 7.6.2.3, se produce un aumento generalizado de la conductividad eléctrica en prácticamente todos los piezómetros (P-1, P-2, P-3, P-7, P-8, D-2 en Anexo 6) durante el periodo septiembre-diciembre de 2009, lo cual queda reflejado en el mapa de isoconductividad correspondiente a la campaña de enero de 2010. Como también se explicó en dicho apartado, estas variaciones coinciden con un periodo de abundantes lluvias (recarga desde el acuífero Messiniense).

Respecto al último mapa elaborado, correspondiente al 11-1-11, se puede decir lo siguiente:

1º) Ha continuado la disminución generalizada y drástica de la conductividad (o se ha mantenido) en los piezómetros situados en las salinas y alrededores. Sorprende cómo se han producido disminuciones espectaculares, como en el P-3, que ha pasado de 35900 a 11900 $\mu\text{S/cm}$; P-8 (de 310900 a 126100); P-1 (de 18500 a 76600) o P-7 (de 57400 a 33100 $\mu\text{S/cm}$). Como hemos dicho anteriormente, las abundantes lluvias caídas en septiembre-octubre de 2009 y los riegos de agua de mar realizados a partir de diciembre del mismo año, en contra de lo que podría pensarse, disolvieron en un principio las sales de la zona no saturada y estas salmueras hipersalinas llegaron hasta la zona saturada, incrementando su conductividad; ésta es la razón por la que en aquella ocasión se alcanzaron las mayores concentraciones conocidas, de hasta 310900 $\mu\text{S/cm}$ en el P-8. Pues bien, una vez disueltas estas sales de la zona no saturada, el agua del mar (menos salada que la del acuífero de Agua Amarga) ha ido rebajando el valor de conductividad de las aguas hipersalinas ligadas al saladar.

2º) El que todavía tengan dos piezómetros (P-8 y P-1) una concentración superior a la del mar es porque sendos puntos están situados en el depocentro de la laguna (probable ubicación de los calentadores de la industria salinera) y en los puntos topográficos más bajos (el P-8 = 0,292 m s.n.m.); ello contribuye a que en estos lugares el espesor de terreno afectado por las aguas hipersalinas es superior que en los demás y por ello todavía se están produciendo diluciones. Otra posible explicación, como se mencionó anteriormente, está asociada a la distribución heterogénea de la conductividad hidráulica.

3º) También los piezómetros situados próximo la costa han visto disminuido su valor en conductividad (de 64000 a 45000-54000 $\mu\text{S/cm}$), aproximándose a la del mar.

Cabe recordar, como se explicó en el apartado 7.5.4, que el movimiento del agua en profundidad puede diferir del que se deduce de los mapas de piezometría de las figuras 7.21, 7.22 y 7.23. La dinámica de flujo de agua en las zonas de mezcla depende tanto de la piezometría establecida en los contornos como de los gradientes de concentración, dando lugar a fenómenos de recirculación de agua en el interior del acuífero. Es decir, el acoplamiento de las ecuaciones de flujo y transporte no permite interpretar los patrones de isoconcentración en función de los patrones de flujo o viceversa, sino que estos son el resultado de la interrelación mutua entre las fuerzas de convección y de difusión (Holzbecher, 1998). En particular, merced a los grandes cambios de concentración existentes en nuestro escenario, la velocidad puntual del agua debida a cambios de concentración es superior a la velocidad asociada al flujo regional, lo que originará fenómenos de recirculación como se verá en el Capítulo 8.

7.6.3. ANÁLISIS QUÍMICOS

La interpretación de los análisis permite caracterizar químicamente las aguas subterráneas e identificar los procesos que tienen lugar en el medio acuífero (mezclas de aguas de diferentes orígenes, intercambio iónico agua-terreno, contaminación marina, etc.), de forma que se pueda validar cualitativamente el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero. Como herramienta más útil para esta interpretación se usan las representaciones gráficas de relaciones iónicas entre los distintos componentes químicos.

Una forma para valorar la calidad de los análisis consiste en calcular el error cometido mediante el balance de cationes y aniones:

$$\text{Error (\%)} = 200 * (\text{rCat} - \text{rAn}) / (\text{rCat} + \text{rAn})$$

Para una conductividad eléctrica superior a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como es el caso de la mayor parte de las muestras, el error admisible no debería superar el 4 %, según Custodio y Llamas (1983).

Se han estudiado 20 muestras de agua, la mayor parte de las cuales fueron recogidas durante campañas de campo (muestras 1, 2, 3, 4, 7, 11, 15, 16, 17, 18, 19 y 20). El resto de análisis corresponde a muestras tomadas por el personal técnico de las desaladoras en controles habituales (muestras 6, 8, 9 y 10), o recogidas en informes internos de la MCT (muestras 12, 13 y 14). La muestra 5 pertenece a uno de los puntos de muestreo de la red de control de calidad química (www.chj.es) en el río Vinalopó, a la altura de Elche. Los resultados completos de los análisis se encuentran en el Anexo 7.

Casi todas las muestras de piezómetros se recogieron mediante una bomba sumergible modelo Amazon-LVM. Cuando la profundidad del nivel freático estaba por debajo de 5 m, se empleó un toma-muestras presurizado (foto 7.5), ya que la fuerza de la bomba no era suficiente para elevar el agua.



Foto 7.5. Detalle del toma-muestras presurizado en el pozo P-19

Las muestras de agua procedentes de las cántaras de almacenamiento de las desaladoras, del mar, de la rambla de Amarga y de la Senieta, se tomaron directamente desde la superficie. Por último, la muestra de lluvia fue recogida en un recipiente preparado con parafina, de forma que no se produjese evaporación.

7.6.3.1. Análisis de las muestras obtenidas durante los ensayos de bombeo realizados en la etapa de investigación previa al funcionamiento de las desaladoras.

Durante la fase de investigación previa al emplazamiento de las desaladoras, se construyeron varios pozos de investigación (figura 5.1) al norte del saladar para la determinación de las características hidráulicas e hidroquímicas del acuífero de Agua Amarga. En los pozos de investigación I-3 (150 m de profundidad) y P-1, P-2 y P-3 (50 m de profundidad) se realizaron ensayos de bombeo en los que se tomó una muestra de agua en cada escalón. Los resultados de los análisis químicos de las muestras correspondientes a escalones con la máxima diferencia de caudal de cada ensayo (mínimo caudal para el escalón A, máximo caudal para el escalón B y caudal intermedio para el escalón C) se exponen en la tabla 7.5.

Muestra	I-3.A	I-3.B	P-3.A	P-3.B	P-1. A	P-1. B	P-2. A	P-2. B	P-2.C	Mar
Fecha	2000	2000	ago-01	ago-01	ago-01	ago-01	ago-01	ago-01	ago-01	jun-10
CE $\mu\text{S/cm}$	75000	84000	39800	531000	52600	56400	55200	57800	56900	56000
Caudal (l/s)	20	110	25	100	100	100	100	120	80	
TSD(mg/l)	660008	73682	30520	52300	44400	45160	44348	47572	45804	44446
HCO ₃ (mg/l)	201	159	272	260	275	281	303	277	286	153
SO ₄ (mg/l)	4366	4248			2573	2474	2255	2932	2802	2859
Cl (mg/l)	36478	41335	16500	25240	25028	25524	25240	26800	25914	24708
NO ₃ (mg/l)	14	11			64	78	104	45	69	11
Na (mg/l)	20240	22979	10688	14028	12962	13226	13360	14428	13760	13694
K (mg/l)	644	644			405	405	397	405	382	65
Ca (mg/l)	3287	3495			2405	2204	2265	1114	966	1736
Mg (mg/l)	790	822			1021	1046	876	1610	1688	771
rNa/rK	53	61			54	55	57	61	61	358
rMg/rCa	0	389			1	1	1	2	3	1
rSO ₄ /rCl	0,09	0,08	0,00	0,00	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09
rCl/rHCO ₃	311	448	104	167	157	156	143	166	156	278
Error %	0,4	0,22	-1,0	-15,9	2,0	0,9	1,8	0,7	0,3	-1,4

Se ha mantenido la nomenclatura original de los pozos pertenecientes a la DA-I, a pesar de que la de alguno de ellos coincide con la de los piezómetros de la DA-II; ello es debido a que la documentación suministrada por dicha desaladora responde a esas referencias. En cualquier caso, se cree que no existirá confusión posible, ya que en cada uno de los temas tratados en la tesis se ha diferenciado entre DA-I y DA-II, y entre pozos y piezómetros respectivamente.

Tabla 7.5. Resultados de los análisis químicos de las muestras tomadas durante los ensayos de bombeo escalonados

Las muestras se han representado en el diagrama de Piper (figura 7.46), y pertenecen a facies clorurada sódica. Estudiando las relaciones iónicas rNa/rCl (figura 7.47) se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Las pendientes de las rectas que forman los grupos de muestras pertenecientes a un mismo pozo son similares. El conjunto de las muestras se sitúa entre los extremos representados por las aguas del pozo I-3 (influenciado por el saladar) y P-3 (influenciado por las aguas del continente).
- En todos los pozos, las muestras extraídas a mayor caudal, presentan valores de concentración superiores a las extraídas a menor caudal.

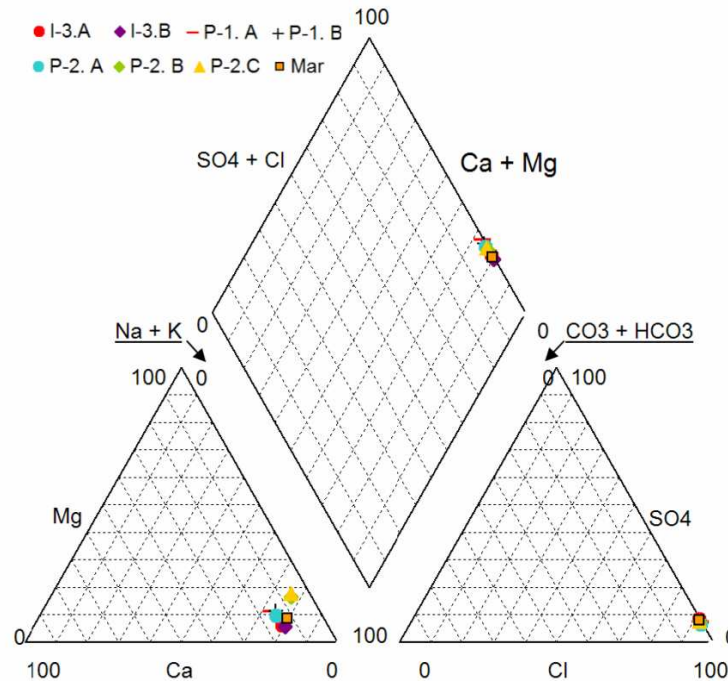


Figura 7.46. Diagrama de Piper de las 10 muestras analizadas, previo al funcionamiento de las desaladoras

- El pozo P-3 presenta conexión hidráulica con el mar, ya que a mayor caudal de extracción, el agua extraída se aproxima más a la composición del agua de mar.
- Las muestras P-2 y P-1 se alinean por debajo de la muestra de agua de mar. La disminución en rNa de estas aguas puede explicarse por procesos de intrusión marina. Al penetrar el agua de mar en el continente, se desencadena el intercambio inverso, por el que el sodio del agua se incorpora a las arcillas del terreno (Giménez Forcada et al., 1995; Custodio y Llamas, 1983). Durante la ejecución de los ensayos, aún no habían comenzado las obras de construcción de los pozos de abastecimiento de la DA-I, por lo que las aguas de intrusión marina, al no encontrarse sometidas al régimen dinámico condicionado por las extracciones de los bombeos de la DA-I, tienen tiempo suficiente para establecer equilibrios de reacción con el terreno.

Por otra parte, los valores de concentración en NO_3 se encuentran comprendidos entre 1,1 mg/l y 10,4 mg/l (tabla 7.5), por debajo de lo que se considera contaminación incipiente (<20 mg/l).

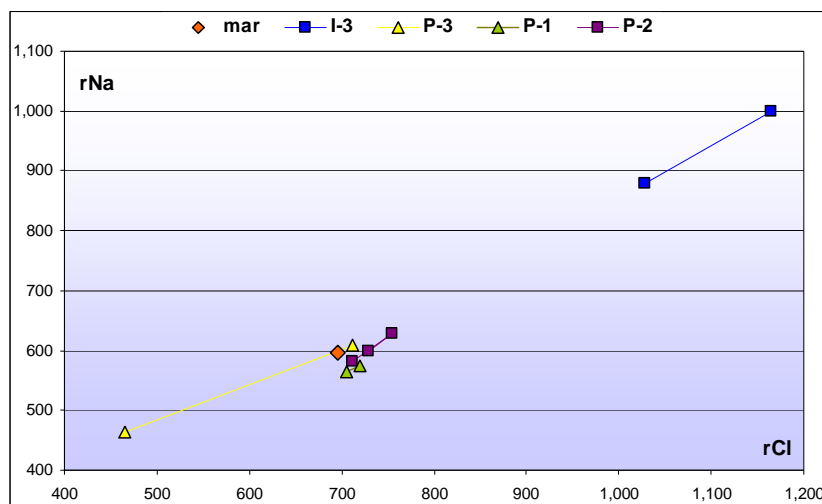


Figura 7.47. Relaciones entre rNa y rCl de las muestras en distintos escalones del ensayo de bombeo llevado a cabo en cada pozo

7.6.3.2. Análisis hidroquímicos de aguas superficiales, lluvia, mar, piezómetros y captaciones con las desaladoras en marcha

i) Balance de cationes y aniones

De los 20 análisis, 16 presentan un error inferior al 4%, y 4 un error comprendido entre 4% y 6,5%. Aun así, se optó porque estos últimos fueran también considerados en el estudio, puesto que éste no requiere un nivel de precisión elevado para los objetivos buscados, teniendo la ventaja de disponer de una representación espacial mayor. El error calculado para cada muestra se resume en la tabla 7.6.

Muestra	Origen	Error (%)	Muestra	Origen	Error (%)
1. Lluvia	Lluvia	1,0	11. Mar	Mar	-1,4
2. Senieta	Charcas	4,3	12. P-150 m	Saladar acuífero profundo	-0,2
3. Pozo Senieta	El salar de la Senieta	0,4	13. P-50 A	Saladar acuífero superficial	0,8
4. Rambla Amarga	Rambla	-1,7	14. P-50 B	Saladar acuífero superficial	0,8
5. Vinalopó-Elche	Río (www.chj.es)	2,5	15. D-2 08	Saladar acuífero superficial	6,4
6. DA-II 08	Cántara DA-II	-5,9	16. P-1 09	Saladar acuífero superficial	-2,6
7. DA-II 10	Cántara DA-II	-3,0	17. P-8 09	Saladar acuífero superficial	0,8
8. Promedio cántara DA-I	Cántara DA-I. 2008	0,8	18. Mar 2	Mar	-1,87
9. DA-II 3	Cántara DA-II	-2,2	19. P-4	Continente acuífero superficial	1,45
10. DA-II túnel	Cántara DA-II	-4,7	20. P-19	Continente acuífero superficial	-1,71

Tabla 7.6. Origen y error calculado mediante balance de cationes en el conjunto de muestras

ii) Clasificación de las aguas

Las muestras se han representado en un diagrama tipo Piper (figura 7.48) a partir del cual se ha establecido la clasificación geoquímica del agua.

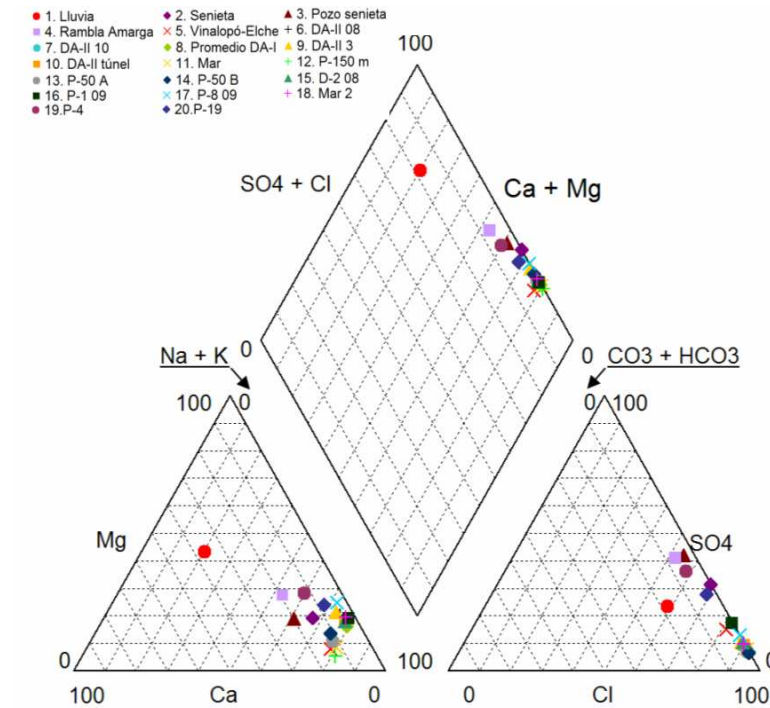


Figura 7.48. Diagrama de Piper de las 20 muestras analizadas, con las desaladoras en marcha

Salvo la muestra de agua de lluvia, que se clasifica como clorurada magnésica-cálcica, el conjunto de las muestras pertenece a facies cloruradas sódicas. Las muestras 3, 4 y 19, que son representativas de aguas continentales no influenciadas ni por el mar ni por el saladar, son las que se sitúan más próximas a la muestra de agua de lluvia y a facies tipo clorurada-sulfatada sódico-cálcica o clorurada-sulfatada sódico-magnésico.

iii) Relaciones iónicas y nitratos. Discusión de resultados

Antes de pasar a describir las relaciones iónicas de las muestras y, aunque no sea relevante para las conclusiones generales, puesto que se dispone de la información, se hace mención al contenidos en nitratos en las mismas (figura 7.49). Los valores más altos los presenta la muestra 4, con 147 mg/l, recogida en la rambla de Agua Amarga, situada al norte del saladar. La rambla recoge aguas superficiales de los campos de cultivo situados al norte de la Sierra del Colmenar, por lo que este valor se atribuye a la contaminación agrícola. Otros valores, entre 5 y 14 mg/l, se encuentran en los pozos superficiales del saladar (muestras 13 a 17, y 19), y se explican por la influencia de las aguas del acuífero superficial continental, procedentes del oeste del saladar donde existen también extensas zonas de cultivos. El resto

de muestras presenta valores por debajo de 5 mg/l. Según los estudios llevados a cabo durante la etapa de investigación previa a la construcción de las desaladoras, el contenido en nitratos es 4 veces mayor en el acuífero superficial que en el cuaternario profundo (MCT-MMA y U.T.E., 2005). Los valores de concentración se encuentran por debajo de lo que se considera contaminación incipiente (<20 mg/l), mientras que la muestra de la Rambla de Agua Amarga se considera como contaminación elevada o de alto grado (>100 mg/l), FCIHS (2009). La presencia de nitratos en los acuíferos puede también explicarse por la presencia de depósitos naturales tipo saladar (Appelo y Postma, 2006).

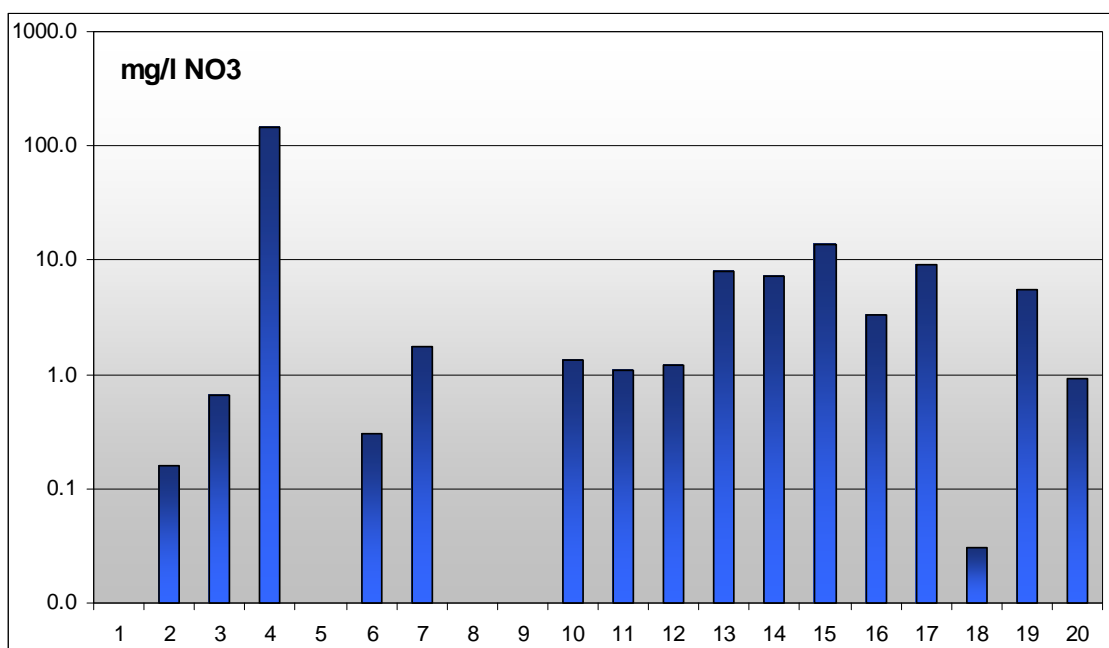


Figura 7.49. Contenido en nitrato (mg/l) de las muestras (escala logarítmica)

Para la interpretación de los resultados de los análisis químicos se recurre al estudio de índices hidrogeoquímicos, la mayoría de los cuales se expresan en meq/l (signo r), y relaciones iónicas.

En la figura 7.50 se ha representado conjuntamente los valores de rCl y rNa. Los pozos situados en el saladar (muestras 12 a 17) presentan valores de concentración por encima de los del agua de mar, debido a la influencia que ejerce el saladar. Las aguas de las desaladoras o del túnel presentan valores próximos a los del mar. El resto de muestras (1 a 5) presentan contenidos por debajo del agua de mar y, sus valores por encima del agua meteórica, se pueden explicar por procesos de concentración por evaporación o por la circulación del agua sobre terrenos salinos (diapiros y manantiales salinos a lo largo del cauce del Vinalopó, muestra 5). La alineación casi perfecta de los valores muestra que, por un lado la fuente principal de sodio procede de las sales de cloruro sódico y, por otro, que la concentración de sodio apenas ha intervenido en procesos de intercambio iónico.

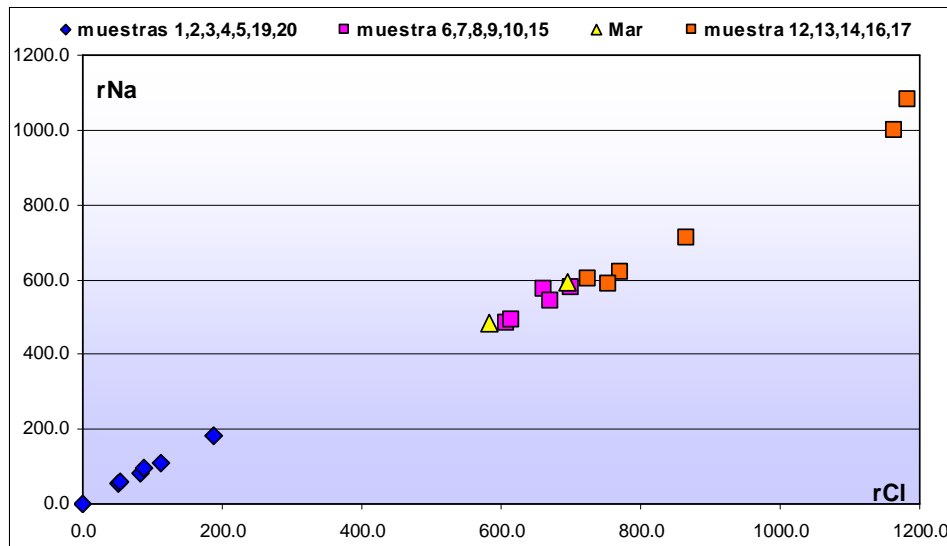


Figura 7.50. Relaciones iónicas entre el rNa y el rCl de las muestras

La figura 7.51 muestra la relación entre los valores $rHCO_3$ y rCl. Se pueden distinguir dos agrupaciones; una formada por muestras influenciadas por aguas meteóricas y continentales (muestras 2, 3, 4, 5, 19 y 20) y otra en la que las muestras se encuentran afectadas por la presencia de aguas marinas (11 y 18) y del saladar (12, 16 y 17).

En la figura 7.52 se presenta la relación $rNa/(rCa+rMg)$ frente a rCl. El círculo engloba a las muestras cuya relación de cationes se sitúa en torno a 3,6, representativo de aguas marinas (FCIHS, 2009). Las muestras no influenciadas ni por el mar ni por el saladar (muestras 1, 2, 3, 4, 5, 19 y 20) presentan los valores más bajos en cloruros y/o de relación de cationes.

La relación entre cationes Na/K para un grupo de muestras (6 a 18), figura 7.53, se sitúa entre valores 40 y 60. Los valores típicos del agua de mar están comprendidos entre 40 y 50, mientras que los de las aguas continentales muestran rangos de variación mucho mayores, (FCIHS, 2009).

En la figura 7.54 se muestra el posible efecto de intercambio iónico inverso entre el Na de las aguas de mar y el Ca de las aguas continentales (Giménez Forcada et al., 1995; Custodio y Llamas 1983). Las muestras 12, 13 y 14 se tomaron cuando los bombes de las desaladoras aún no se habían puesto en marcha, por lo que el proceso de intrusión marina en el acuífero podría encontrarse entonces en equilibrio, permitiendo el intercambio iónico entre las aguas marinas y el terreno. Este fenómeno hoy día no puede ser observado debido a dinámica impuesta en el régimen de explotación, la cual aumenta la velocidad de las aguas subterráneas impidiendo que estas reacciones alcancen el equilibrio.

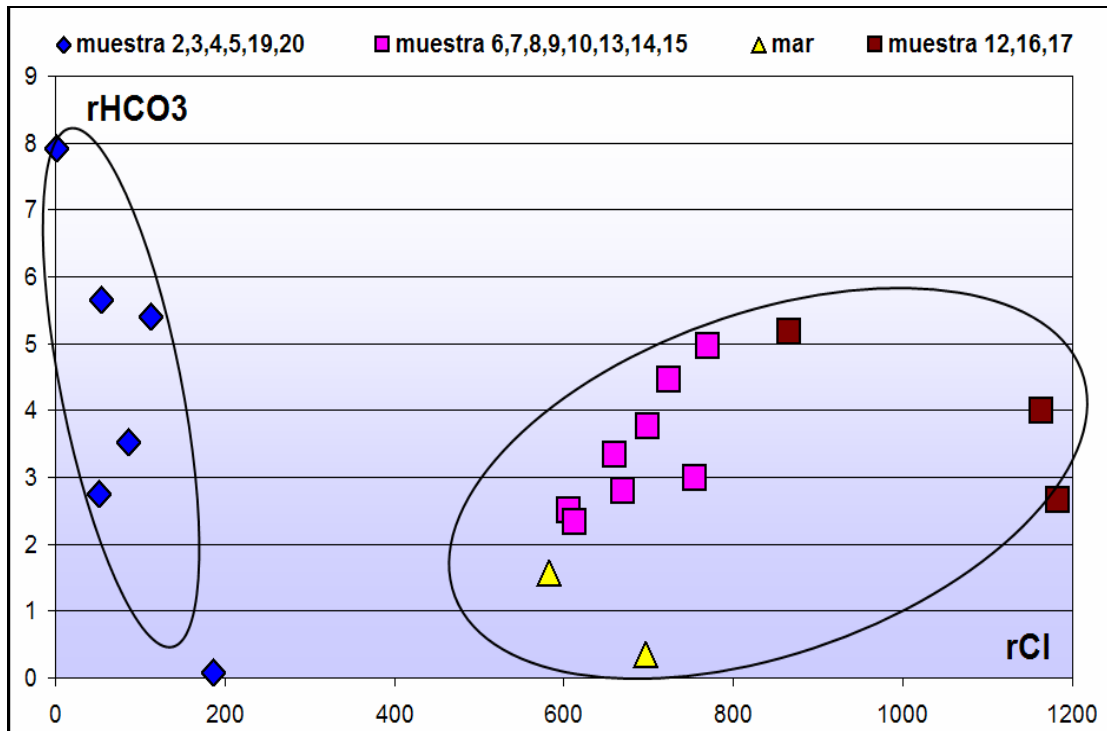


Figura 7.51. Relaciones iónicas entre $rHCO_3$ y rCl de las muestras

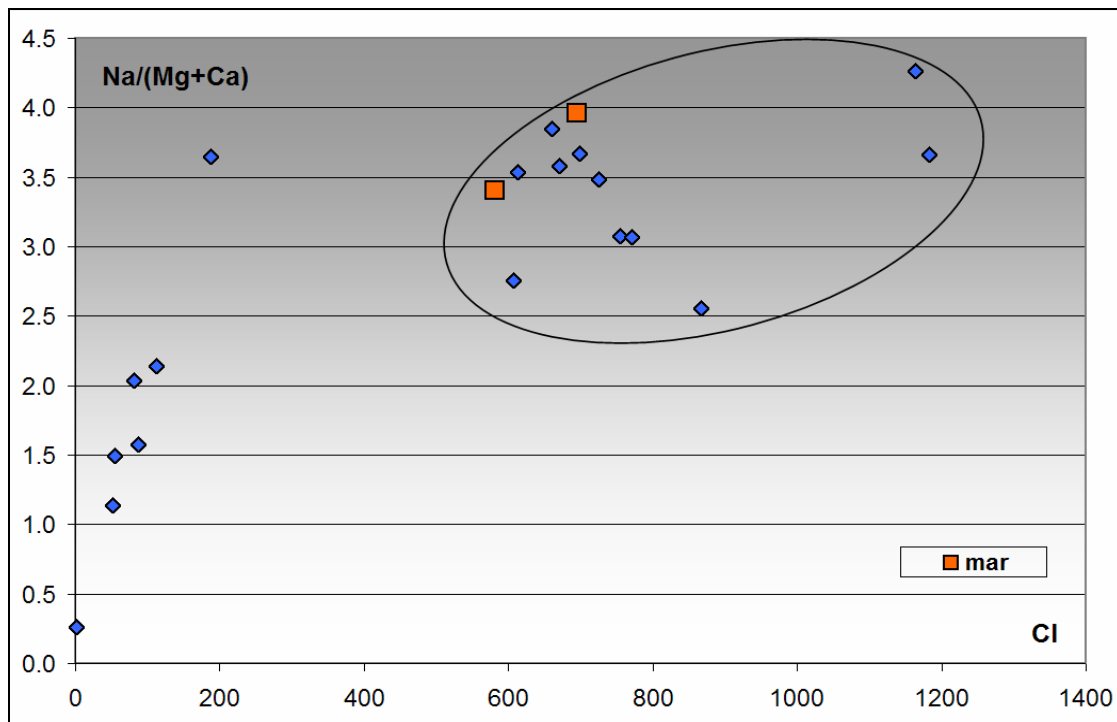


Figura 7.52. Relaciones iónicas entre $rNa/(rMg + rCa)$ y rCl de las muestras

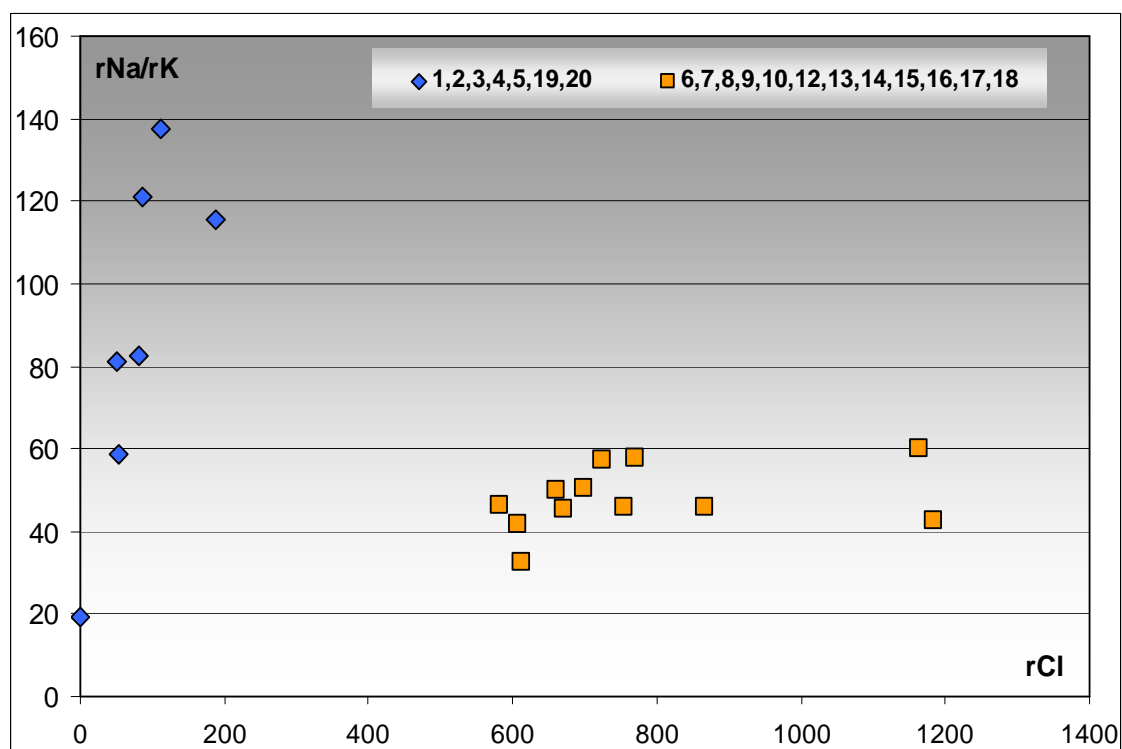


Figura 7.53. Relaciones iónicas entre rNa/rK y rCl de las muestras

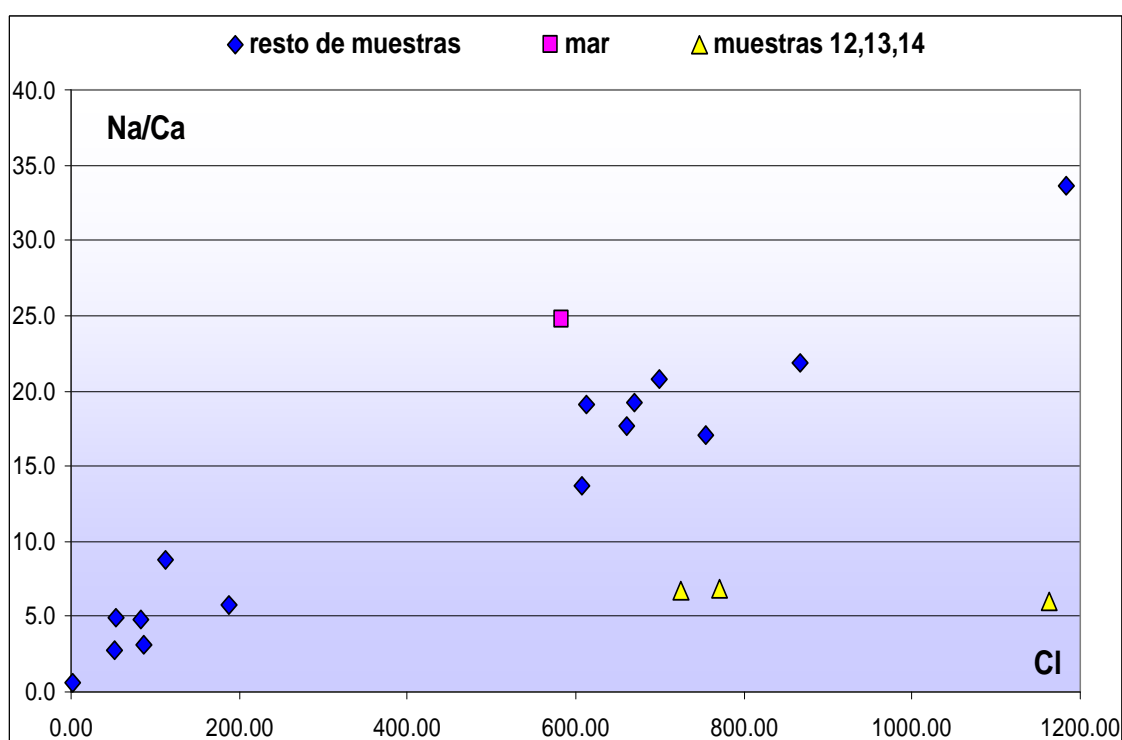


Figura 7.54. Relaciones iónicas entre rNa/rCa y rCl de las muestras

En la figura 7.55 se han representado los valores de $icb [(rCl/r(Na+K))/rCl]$ frente a los valores de rCl . Las muestras de agua continental se agrupan en torno al valor 0, mientras que las muestras influenciadas por el mar se agrupan en torno al valor 0,13 (FCIHS, 2009).

En la figura 7.56 puede verse cómo se alinean los valores de conductividad eléctrica con los valores de rCl de las muestras. Esta alineación tiene como valores extremos la muestra de agua de lluvia (valores más bajos) y la muestra del piezómetro del saladar P-1 (valor más alto). La alineación de las muestras denota que la aportación de las sales de cloruro a la conductividad eléctrica es independiente de los procesos de mezcla.

En la figura 7.57 se ha representado los valores de conductividad eléctrica frente a rSO_4 . Las muestras se agrupan en torno a dos líneas; una cuyos extremos están representados por las aguas meteóricas y el agua de mar y que tiene menor pendiente (línea 1), y otra que representa la mezcla entre el agua de mar y el agua del saladar y que tiene mayor pendiente (línea 2). La aportación de los sulfatos a la conductividad eléctrica está condicionada por procesos de mezcla en las aguas.

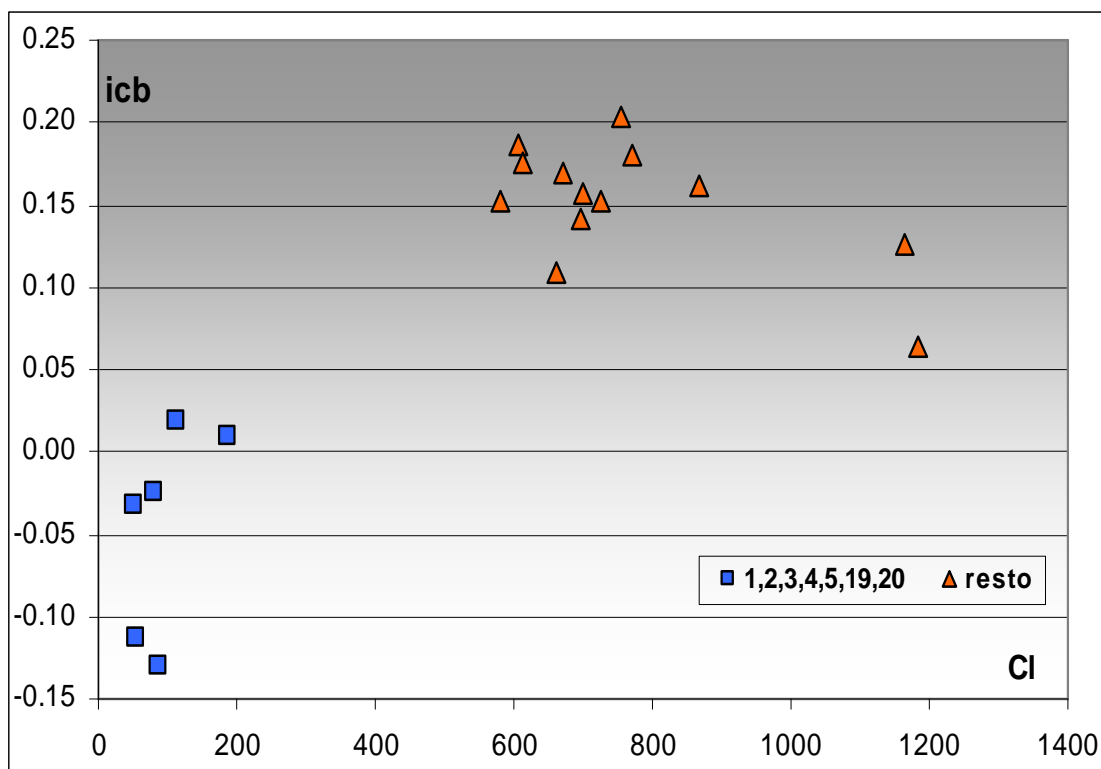


Figura 7.55. Relaciones entre icb y rCl de las muestras

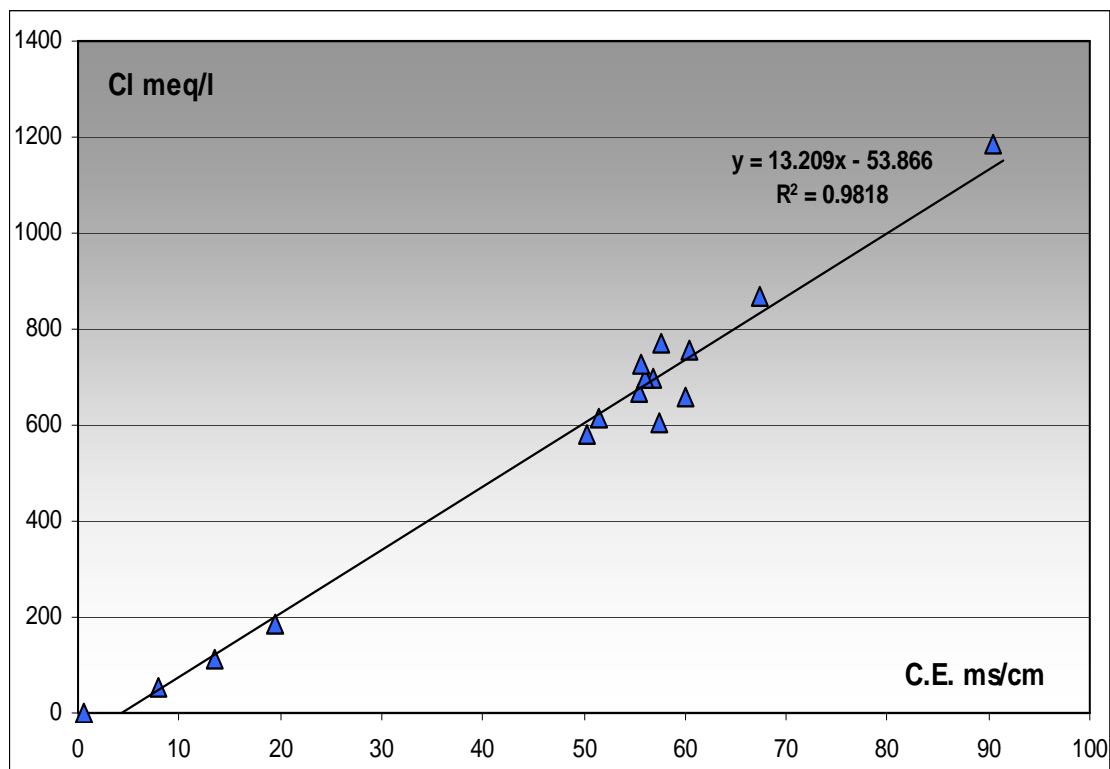


Figura 7.56. Relaciones entre rCl y la conductividad eléctrica de las muestras

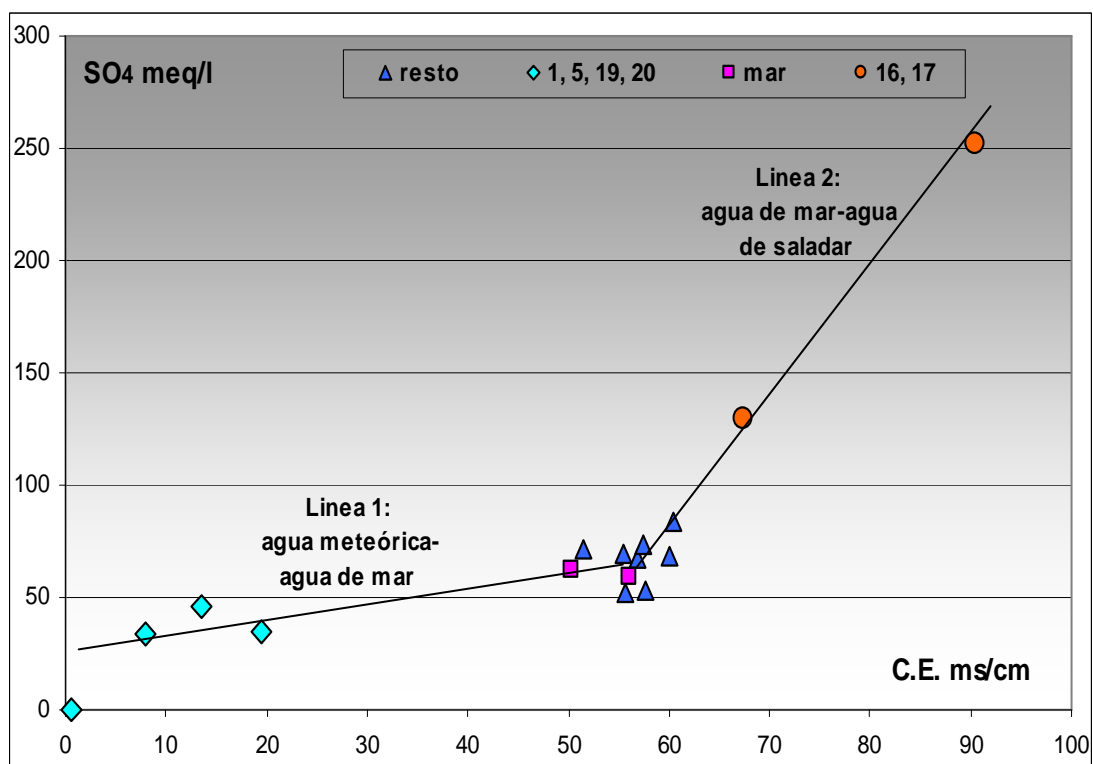


Figura 7.57. Relaciones entre rSO₄ y la conductividad eléctrica de las muestras

7.6.4. ORIGEN DE LA SALINIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Son varios los factores que condicionan la salinidad de las aguas en la zona de estudio: climáticos, geológicos, antrópicos y de intrusión marina. En climas semiáridos, donde la evapotranspiración es muchas veces mayor que la lluvia y cuando llueve lo hace de forma torrencial (figuras 2.4), el agua que se infiltra y llega hasta el acuífero arrastra sales que se han ido acumulando en los horizontes del suelo. Además, si el nivel freático se encuentra próximo a la superficie, puede provocar fenómenos de evapotranspiración por ascenso capilar con el consecuente aumento de la salinidad en la zona no saturada (Custodio y Llamas, 1983). Este proceso es más acentuado en zonas próximas al mar, donde las lluvias presentan concentraciones en sales mayores por el efecto del aerosol marino.

El factor geológico es el condicionante natural de mayor peso. Por un lado las aguas profundas suelen ser más salinas que las superficiales, ya que llevan más tiempo en contacto con los materiales y han podido disolver más sales. Normalmente, la salinidad, la temperatura y el tiempo de residencia de las aguas aumentan con la profundidad. Si el acuífero está formado por terrenos algo arcillosos de origen marino, entonces este hecho se superpone y contribuye al fenómeno anterior, (Custodio y Llamas, 1983). Los acuíferos inferiores del Tortonense y Triás del Campo de Elche, reúnen las condiciones para albergar aguas de elevada salinidad (IGME-DPA, 1994), como ya quedó constatado en los acuíferos profundos de la Vega Baja del Segura, (IGME, 1974). Por otra parte, la presencia en el entorno geológico de domos salinos triásicos (figura 7.58), el más próximo situado a menos de 10 km de distancia de la zona estudiada, en Sierra Grossa, podría contribuir también a la explicación del origen del valor tan elevado de salinidad en las aguas subterráneas; de hecho, en el cauce de la Rambla Salada de Albaterra existen abundantes eflorescencias de halita (foto 7.6a), que proceden de un manantial salado (foto 7.6b) relacionado con un diapiro triásico situado a 25 km al Oeste de la zona de estudio.

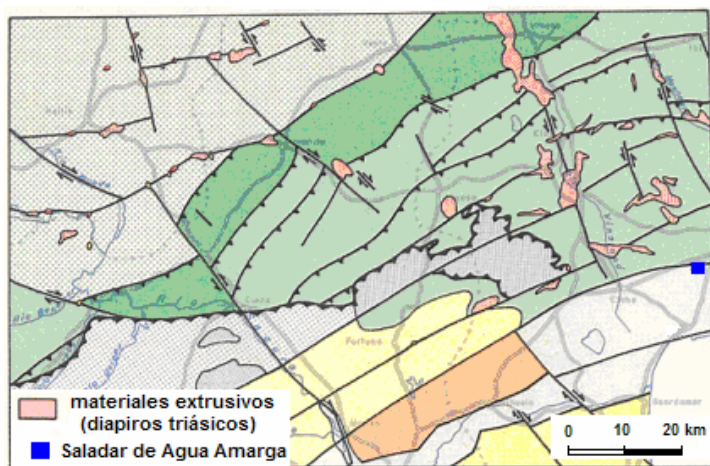


Figura 7.58. Esquema geológico regional con la distribución de diapiros salinos (en color salmón) en el entorno geológico de la zona de estudio. Modificado de IGME (1985)



Foto 7.6 a) Eflorescencias de halita en el cauce de la Rambla de Albaterra y b) manantial de agua salada en la rambla de Albaterra

Son muchos los elementos del paisaje hídrico de la parte nororiental de la Vega Baja del Segura y Campo de Elche que deben su topónimo al carácter salobre de sus aguas, como las Salinas de Santa Pola, Salinas de Bras del Port, El Salar de la Sinieta, El Saladar de Agua Amarga, etc.

En la cuenca del Río Vinalopó confluyen numerosos manantiales de aguas hipersalinas, como los de Petrel, Monforte del Cid o Novelda, así como los drenajes de lagunas endorreicas salobres, como la Laguna de Villena, las Salinas de La Fortuna, las Salinas de la Redonda y las Salinas de Peñalva (Alfaro et al., 2004). Los valores de conductividad eléctrica registrados de forma continua desde 1994 en las aguas del Vinalopó a la altura del Embalse de Elche oscilan entre 15-28 mS/cm (www.chj.gob.es/redescalidad).

En la figura 7.59 se muestra un mapa de isoconductividades del acuífero cuaternario oriental del Campo de Elche referido al año 1991, al sur del acuífero costero de Agua Amarga. En él se observa que la conductividad está comprendida entre 5.000 y 8.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que aumentaba hacia el este (hacia el mar) y que en nuestra zona de estudio corresponde al de la isolínea de mayor valor.

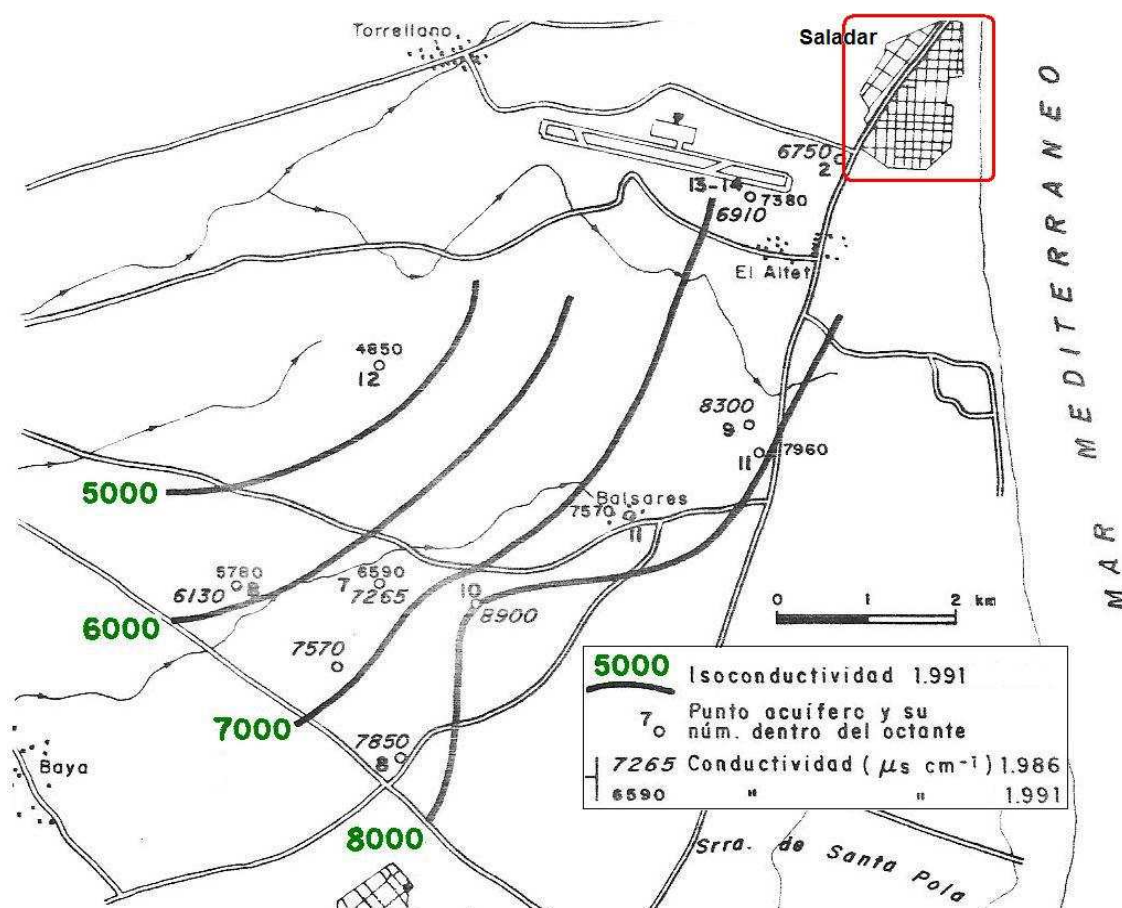


Figura 7.59. Distribución de líneas de isoconductividad al sur del acuífero costero de Agua Amarga, Rodríguez Estrella et al. (1992)

Por otro lado, las aguas superficiales que se infiltran a través de suelos salinos o depósitos de sales originados por la evaporación natural de antiguas lagunas o por la actividad antrópica (industria salinera), se cargan de sales y llegan con grandes concentraciones a la zona saturada.

El Saladar de Agua Amarga constituye un antiguo ‘lagoon’ separado actualmente de la costa por un cordón de arena (restinga) y sobre cuya superficie se desarrolló durante el siglo pasado la actividad de la industria salinera. En los sondeos a testigo continuo realizados para la instalación de piezómetros sobre la superficie del saladar se comprobó la presencia de cristales de sal a profundidades que alcanzaban los 6 primeros metros de columna litológica. La existencia de sal en las aguas subterráneas que circulan bajo el saladar es debida básicamente a la presencia de estos suelos salinos.

La intrusión marina es otro fenómeno que condiciona la salinidad del agua en acuíferos costeros. La salinidad del agua de mar oscila entre 35 y 44 g/l (Custodio y Llamas, 1983), con un rango de conductividad eléctrica entre 45 y 55 mS/cm. Las muestras de agua del Mar Mediterráneo de la zona, analizadas en laboratorio para esta tesis, tienen una salinidad

en torno a 42 g/l y un rango de conductividad eléctrica entre 40 y 48 mS/cm (figura 7.58), según las medidas tomadas in situ en el periodo 9-210/1-2011. La conductividad eléctrica de las muestras de agua subterránea presenta un amplio espectro de valores, desde 310 mS/cm, en piezómetros situados sobre el saladar, hasta 6 mS/cm en los situados al oeste del mismo.

El estado de la intrusión salina es difícil de evaluar. El análisis del escenario en el que existe un gradiente hidráulico dirigido hacia el mar desde el acuífero libre superficial, conduce a un esquema de penetración del mar en el continente (Badon Ghijben, 1889; Herzberg, 1901; Hubbert, 1940; Henry, 1964a y 1964b), con el desarrollo de un pie de intrusión bajo la línea de costa y el estrechamiento de las líneas ascendentes de flujo de agua dulce desde el continente hacia la línea mar (figura 7.60).

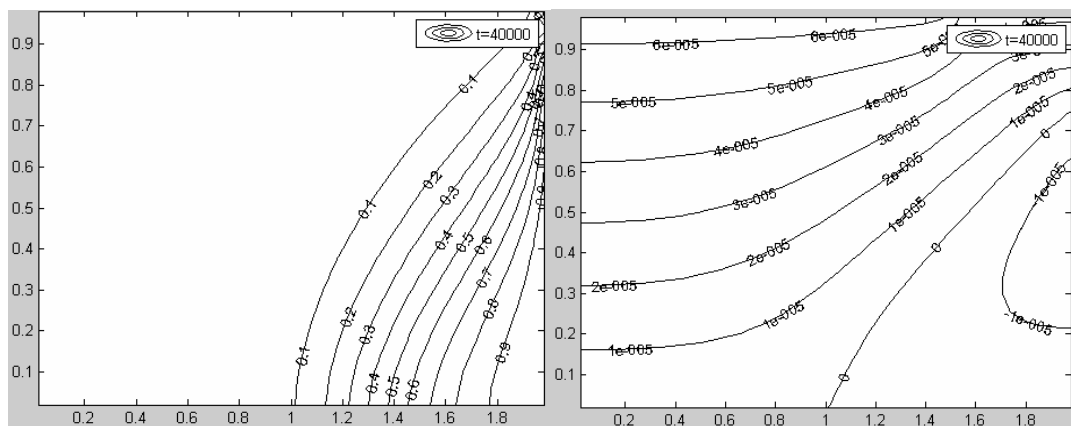


Figura 7.60. Esquema típico de intrusión marina en un acuífero libre con descarga de flujo hacia el mar. Líneas de isoconcentración (izquierda), líneas de corriente (derecha), según Henry (1964)

Sin embargo, existen otros componentes geológicos y antrópicos que pueden alterar el estado de la intrusión marina y la forma de la cuña. La heterogeneidad de las capas que conforman el acuífero (tabla 7.1) para el escenario que nos ocupa, condiciona la mayor o menor penetración del pie de intrusión en dichas capas. Además, el grado de incertidumbre en torno a cuál es la piezometría de las capas del Messiniense no permite establecer sus relaciones con el mar que, por otra parte, deben estar muy condicionadas por la presencia de aguas de conductividad eléctrica por encima de los 65 mS/cm. La salinidad de las aguas, por sí sola, podría actuar como una barrera a la entrada de agua de mar en el continente.

Los factores antrópicos son los que desvirtúan más el escenario de intrusión. Por un lado, la imposición de una lámina de agua salada permanente durante 50 años sobre la superficie del saladar junto con los canales que conectaban éste con el mar para abastecer la industria, ha supuesto una recarga constante al acuífero con agua que, como mínimo, tendría la salinidad del mar (en torno a 40 mg/l) y, como máximo, la concentración alcanzada en los calentadores, donde comienzan a precipitar los cloruros, en torno a 300 g/l (Chang, 1992). Un

escenario de este tipo modifica de forma considerable la forma de la interfase, desplazando los frentes de intrusión marina hacia el continente (Alhama et al., 2010c y 2010h) y provocando la inversión de la cuña de intrusión, como se verá en el capítulo 8. La figura 7.61 muestra la evolución de las isolíneas de concentración de un escenario transitorio, 2-D, típico de intrusión salina en un acuífero de dos capas, afectado por la presencia de un saladar, como es el caso del acuífero de Agua Amarga. Por simplicidad, se ha asumido para el saladar una condición de concentración constante igual a la del mar. El flujo regional se dirige desde el continente hacia el mar (situado a la derecha), simulado como un borde de piezometría y concentración constantes. Las líneas de concentración bajo el saladar interfieren con la cuña de intrusión hasta que la región bajo el saladar y a la izquierda de éste queda completamente contaminada. Los tres gráficos representan periodos de tiempo sucesivos.

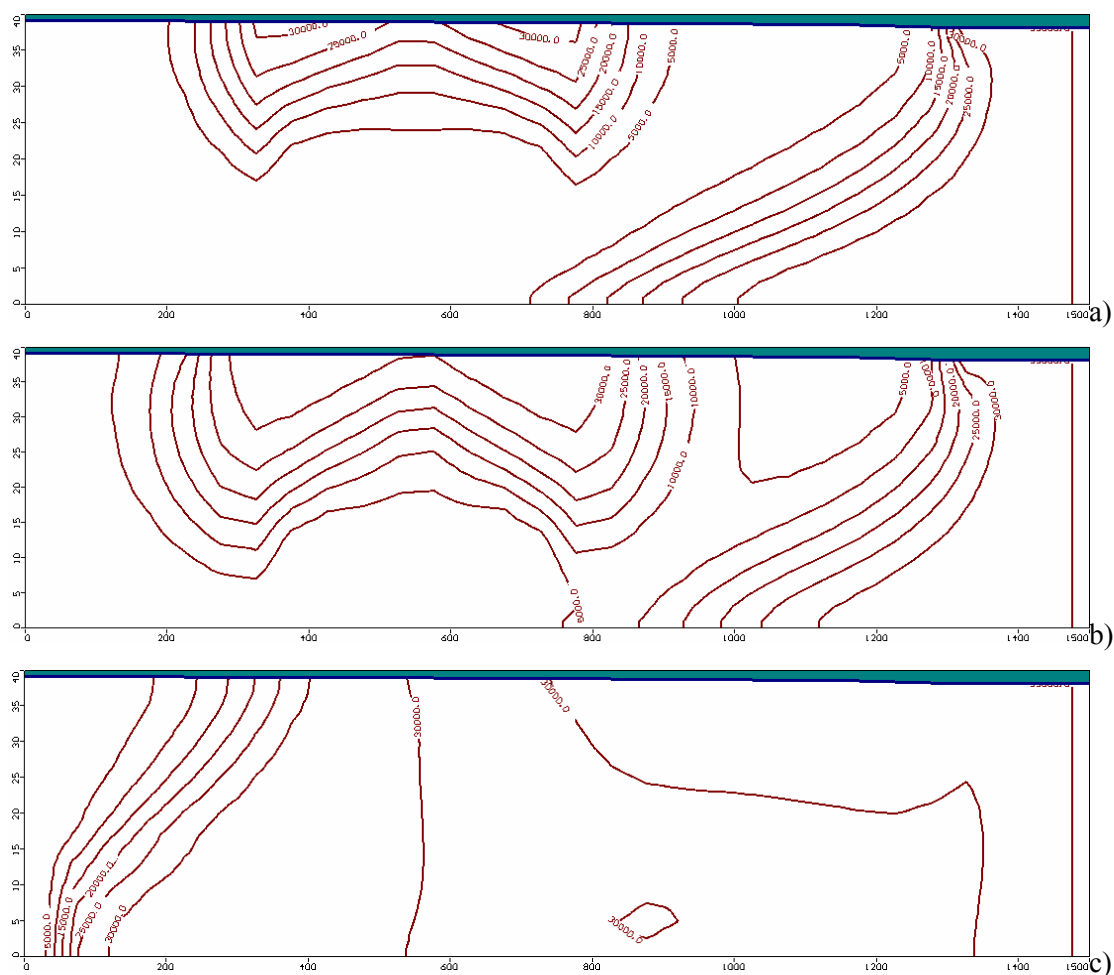


Figura 7.61. Efecto de una lámina de agua de mar impuesta sobre la superficie del saladar. Evolución de la isolíneas de concentración. a): 1 año, b): 5 años y c): 10 años (Alhama et al., 2010c y 2010h)

El efecto de la actividad salinera sobre el acuífero no desapareció con el fin de las explotaciones. Las aguas de lluvia de recarga directa desde la superficie del saladar o las

subterráneas que desde el continente circulan por el acuífero bajo el saladar, modifican su concentración cargándose en sales.

Otra intervención antrópica es el reciente programa de vertidos con agua de mar sobre la superficie del saladar que, desde diciembre de 2009, se ha puesto en marcha como medida compensatoria de las afecciones causadas en la piezometría bajo el saladar por las extracciones de las desaladoras DA-I y DA-II. Esta medida, prevista en la Declaración de Impacto Ambiental incluida en el proyecto de investigación MCT-MMA y U.T.E. (2005), es una de las llevadas a cabo por la MCT para la preservación de los valores ecológicos del Saladar de Agua Amarga. Respecto a la hidroquímica del acuífero, esta actividad ha supuesto una nueva variación de la salinidad de las aguas bajo el saladar.

Por último, en el entorno de las extracciones de las desaladoras, se han generado depresiones piezométricas que han alterado de forma definitiva el equilibrio natural de la cuña de intrusión marina. Si bien el mar ha invadido el espacio comprendido entre las captaciones de la DA-I y la línea de costa, (como demuestran los mapas de piezometría, al presentar valores negativos), la invasión hacia el continente más allá de la línea marcada por las captaciones se encuentra limitada por el efecto barrera hidráulica negativa causada por las mismas (Abarca et al., 2006). Debido a que parte del agua continental que descarga hacia el mar de forma natural (y que en última estancia es la que contiene el avance de la intrusión hacia el continente) es derivada hacia las captaciones (como se verá al final de este Capítulo), es muy probable que al sur de los pozos verticales de extracción, en la zona del saladar, se produzca un avance del frente de intrusión hacia el continente; este aspecto queda de manifiesto en la simulación, Capítulo 8.

7.6.5. ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA

7.6.5.1. Generalidades

Los isótopos estables ^{18}O y ^2H de la molécula de agua tienen diversas aplicaciones en el estudio de las aguas subterráneas. En condiciones de presión y temperatura habituales se comportan como conservativos y el estudio de las relaciones isotópicas (coeficientes de reparto) $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^2\text{H}/^1\text{H}$ en muestras de agua subterránea aporta información sobre la composición isotópica de las aguas de origen y sobre los procesos de mezcla que tienen lugar en el acuífero. La figura 7.62 ilustra sobre los procesos que influyen en los valores de desviación isotópica de muestras.

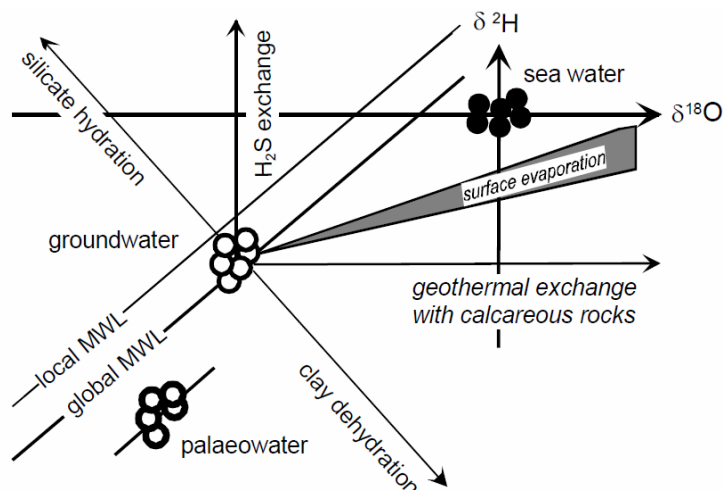


Figura 7.62. Procesos involucrados en los valores de desviación isotópica, referida a ‰ v-SMOW, modificado de Mook (2001)

Las propiedades físico-químicas de los isótopos ^{18}O y ^2H de la molécula de agua la hacen susceptible de experimentar fraccionamiento isotópico durante los cambios de fase; éste puede medirse mediante el coeficiente de fraccionamiento α , que establece la relación entre los coeficientes de reparto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$ de dos fases distintas. El fraccionamiento está condicionado por factores ambientales como la temperatura, la presión, la latitud, la proximidad a la costa y la cantidad e intensidad de las precipitaciones (Mook, 2001 y Clark y Fritz, 1997).

La desviación isotópica (δ) establece la diferencia entre el coeficiente de reparto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$ de la muestra patrón y un estándar, el V-SMOW - Standard (Vienna – Standard Mean Ocean Water, distribuido por ‘The International Atomic Energy Agency’ en Viena). Se suele expresar en ‰ referido al estándar.

7.6.5.2. Contenido isotópico de las aguas estudiadas

Los resultados obtenidos del análisis isotópico de las muestras recogidas en marzo de 2010 se exponen en la tabla 7.7.

La relación entre δD y $\delta^{18}\text{O}$ para las aguas de lluvia (utilizando el patrón ‰ v-SMOW) se ajusta a una línea de ecuación $\delta\text{D} = A\delta\text{O}_{18} + B$, donde A es $7,7 \pm 1$ y B (exceso de Deuterio) 14 ± 5 en la zona del Mediterráneo occidental-norte de África (IAEA, 1983; Custodio y Llamas, 1983). Los valores del exceso de deuterio se adquieren durante la evaporación y no cambian significativamente en la evolución posterior de la masa nubosa, salvo por evaporación. Puede ser un indicador de la génesis de ese vapor (Rindsberger et al., 1983). El parámetro B se obtiene por cálculo a partir de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, debiendo corresponder a una misma muestra de agua y no a valores medios, para evitar introducir errores. La marca isotópica del agua de recarga se calcula ponderando el valor mensual con

las lluvias mensuales y dividiendo por la lluvia total anual. Ante la ausencia de datos representativos de todo el año, el resultado de las muestra analizada se ha representado junto a dos rectas meteóricas; una correspondiente al mediterráneo occidental (RMMO), $\delta D = 8\delta^{18}O + 14\text{‰}$, (FCIHS, 2009), y otra obtenida a partir de los datos de las muestras recogidas en la estación de código 0824500 y coordenadas $39^{\circ} 28' 00''/-0^{\circ} 22' 60''/13$ de la ciudad de Valencia, que pertenece a la red mundial de caracterización isotópica de las precipitaciones ('Global Network Isotopes in Precipitations'). Se ha adoptado los valores medios del periodo 2000 a 2004, tabla 7.8, ponderados con los registros de lluvias. Los datos están disponibles en la web de la Organización Internacional de la Energía Atómica (www.IAEA.org).

Muestra	Descripción	C.E. ms/cm	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)
mar	Agua de mar	56.6	6.9	1.46
DA-II	Cántara DA-II	59.2	6.6	1.33
DA-I	Cántara DA-I	60.1	2.1	1.11
P-16	Piezómetro línea costa	85.0	-1.4	-0.03
P-1	Piezómetro saladar	30.6	-5.8	0.59
P-8	Piezómetro saladar	15.5	-2.4	2.17
P-2	Piezómetro saladar	8.5	-35.3	-4.57
P-3	Piezómetro continente	15.0	-33.8	-4.20
P-4	Piezómetro continente	59.1	-32.4	-3.64
lluvia	Lluvia en desaladora	0.5	-58.8	-9.15

Tabla 7.7. Valores de desviación isotópica de las muestras recogidas en la zona de estudio

Month	Oxygen-18	Deuterium	Deut.Excess
	Weighted Mean (‰)	Weighted Mean (‰)	Weighted Mean (‰)
Jan	-3.67	-19.8	9.5
Feb	-4.43	-24.1	11.3
Mar	-3.86	-17.8	13.1
Apr	-4.8	-29.7	8.7
May	-4.78	-20.7	17.5
Jun	-3.3	-12.3	14.1
Jul	-0.4	-1.8	1.4
Aug	-4.49	-25.7	10.2
Sep	-3.74	-22.4	7.5
Oct	-5.67	-35	10.4
Nov	-7.43	-51.6	7.8
Dec	-6.31	-40.5	10

Tabla 7.8. Datos para la elaboración de la RMV, obtenidos a partir de la GNP (www.IAEA.org)

En la figura 7.63 se han representado las muestras del área de estudio y las rectas meteóricas RMV y RMMO.

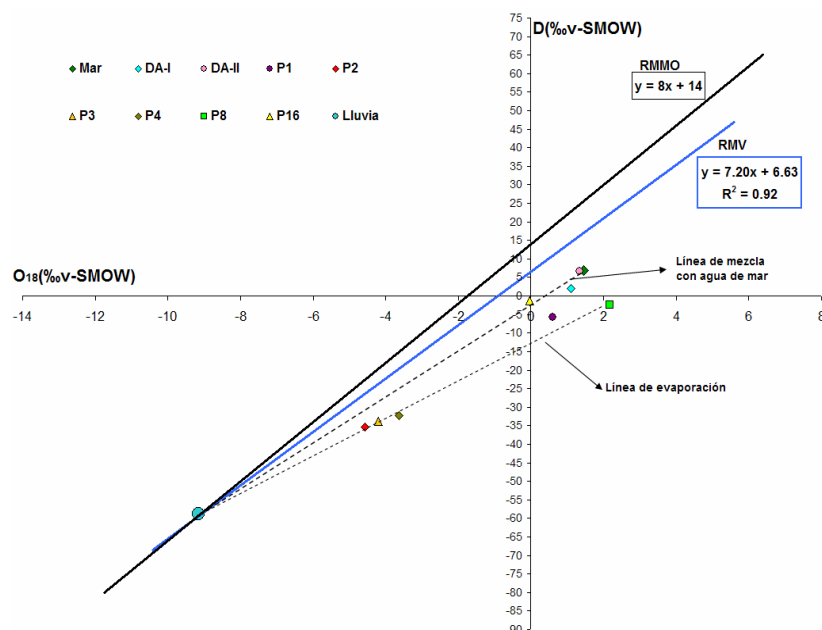


Figura 7.63. Representación de los valores de desviación isotópica de las muestras y de las rectas meteorológicas RMV y RMMO

Del gráfico anterior se derivan las siguientes observaciones:

- Las muestras se encuentran comprendidas en un área marcada por las líneas de mezcla de agua marina y la línea de evaporación.
- Las muestras P-16, DA-I y DA-II se encuentran sobre la línea de mezcla con agua de mar. Las muestras de las desaladoras, sobre todo la DA-II, se sitúan muy próximas a la muestra procedente de agua de mar, mientras que la muestra del piezómetro P-16, localizado entre el saladar y la línea de costa (en una zona afectada por la intrusión marina ocasionada por las captaciones en el túnel de drenaje), presenta un efecto de dilución con agua continental, motivo por el que se encuentra desplazada hacia valores de desviación isotópica menor que el agua de mar.
- Las muestras de los piezómetros P-1 y P-8 se sitúan próximas al agua de mar, debido a la influencia de los vertidos que, desde diciembre de 2009, se realizan sobre la superficie del saladar con agua marina. Ambas presentan desviaciones isotópicas respecto a la línea de mezcla con agua de mar, que se interpretan por el efecto causado por la evaporación que tiene lugar tanto en las salinas (evaporación previa a la infiltración del agua de mar vertida) como en las aguas subterráneas procedentes del continente.
- Finalmente, las muestras de los piezómetros P-2, P-3, P-4 y P-8 se sitúan sobre la línea de evaporación, proceso de importancia en la zona de estudio, con valores en torno a

900 mm/a. La proximidad del nivel freático y la presencia de cobertura vegetal potencia el proceso de evapotranspiración desde la capa freática (Mook, 2001).

La variación de la salinidad con el contenido isotópico se relaciona con procesos de disolución de sales, de evaporación, de mezcla con agua de mar, o de una combinación de estos, como se representa de forma esquemática en la figura 7.64.

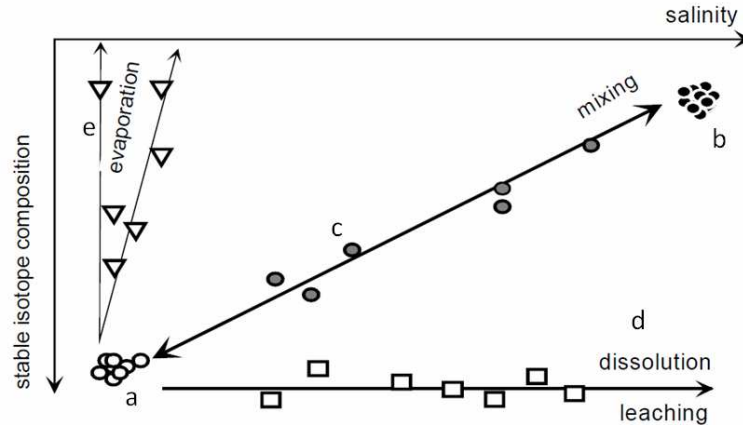


Figura 7.64. Composición isotópica frente a salinidad en la identificación de diferentes procesos de salinización: agua dulce (a), agua mineralizada (b), mezcla de ambas (c), disolución de sal, infiltración y tiempo de residencia (d) y evaporación (e) (Mook, 2001)

En la figura 7.65 se ha representado las muestras en un gráfico que relaciona la desviación isotópica $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ v-SMOW con las conductividades eléctricas a 20°C.

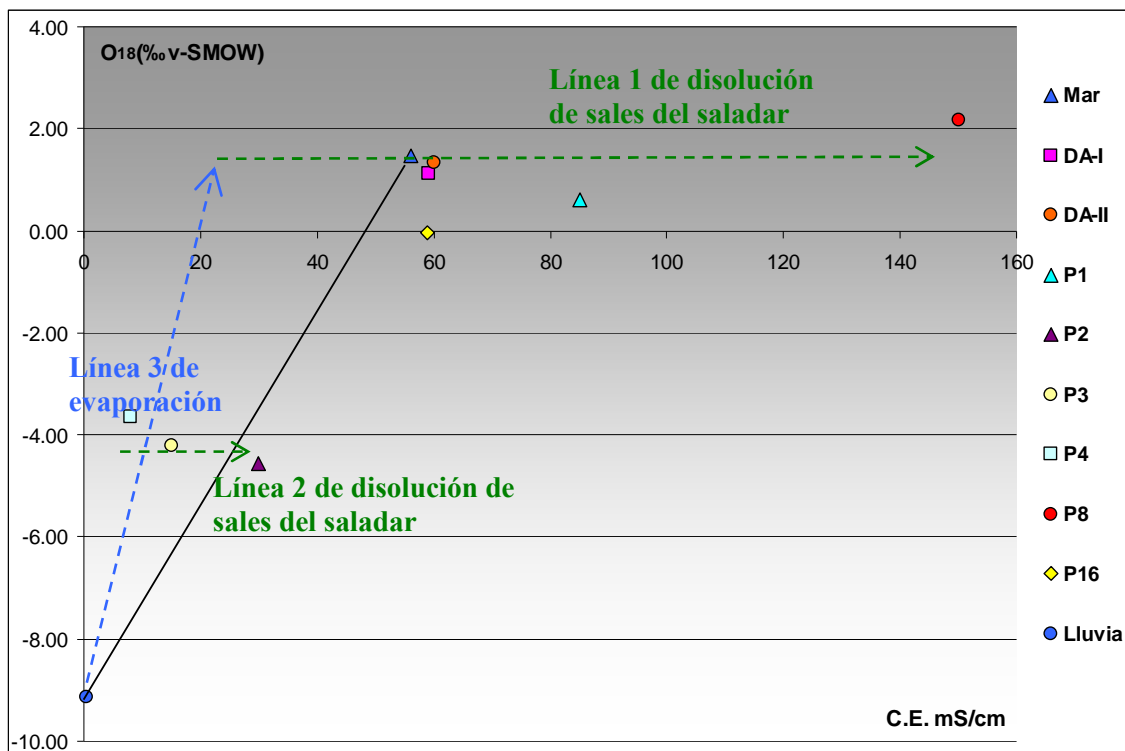


Figura 7.65. Relación entre la desviación isotópica $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ v-SMOW y la conductividad eléctrica

Sobre el gráfico se han trazado tres líneas auxiliares. Las horizontales 1 y 2 representan el proceso de disolución de sales por la circulación de aguas bajo el saladar, donde se han encontrado cristales de sales de cloruro y sulfatos a profundidades que alcanzan los 6 m. Las muestras P-1 y P-8, que tienen un contenido isotópico próximo a la muestra de mar, se sitúan en el gráfico en una posición resultado de la combinación de la línea 3 (evaporación) y la línea 1 (disolución de sales). La línea 2 está asociada a muestras de agua continental con un contenido en sales tanto mayores conforme los puntos de muestreo se sitúan más próximos al saladar, es decir, en el orden P-4, P-3, P-2. La variación isotópica de estas muestras respecto a la muestra meteórica, representada por la línea 3, responde a un fenómeno de evaporación.

7.6.6. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA

7.6.6.1. Registros DA-I

i) Registro en los pozos de abastecimiento, julio de 2009

En la figura 7.28, que representa la variación de la temperatura del agua de los pozos de extracción de la DA-I en julio de 2009, se aprecia cómo la temperatura varía de forma algo arbitraria, no permitiendo establecer una correlación clara con la conductividad eléctrica. A excepción de los pozos P-8, P-16, P-26, P-30 y P-32 (cuyos registros de temperatura pueden explicarse por la heterogeneidad del medio geológico), se aprecia una tendencia al aumento de la temperatura conforme los pozos son más profundos. El pozo de P-28 es el que presenta mayores valores de conductividad eléctrica y temperatura, ello tal vez pueda ser debido a que existe una comunicación vertical kárstica (ligada a alguna falla) con zonas más profundas.

ii) Registros en el agua de la cántara de almacenamiento: años 2004-2010

En la figura 7.29, que representa la temperatura del agua de la cántara de almacenamiento para el periodo 2004-2010, se aprecia como las oscilaciones de la misma responden a las variaciones interanuales de la temperatura del agua de mar. Los valores máximo y mínimo se acentúan debido a que la cántara se encuentra en el continente, donde las temperaturas son siempre algo más extremas a lo largo del año.

7.6.6.2. Registros en la zona del saladar y alrededores: años 2008 a 2010

En el Anexo 8 se recogen las gráficas de evolución temporal y en profundidad de la temperatura en los piezómetros de la red durante el periodo mayo de 2008 a agosto de 2010. Se efectuó un registro de medida de temperatura cada metro de profundidad, a partir de la intersección con el nivel piezométrico, a la par que se anotaba el valor de conductividad eléctrica. En función de las observaciones realizadas, se han subdividido los resultados en tres zonas: piezómetros situados en el saladar y alrededores del mismo, piezómetros situados junto a la línea de costa y piezómetros junto a las captaciones de la DA-I.

iii) Registros en el saladar y alrededores del mismo

Los piezómetros situados sobre el saladar y hacia el continente (de P-1 a P-8 y D-2) presentan el típico perfil en forma de cono invertido (figura 7.66), con un rango de temperaturas en superficie condicionado por la hora a la que se tomara la medida y por la época del año, y una estabilización en profundidad hacia valores entre 18 y 21°C.

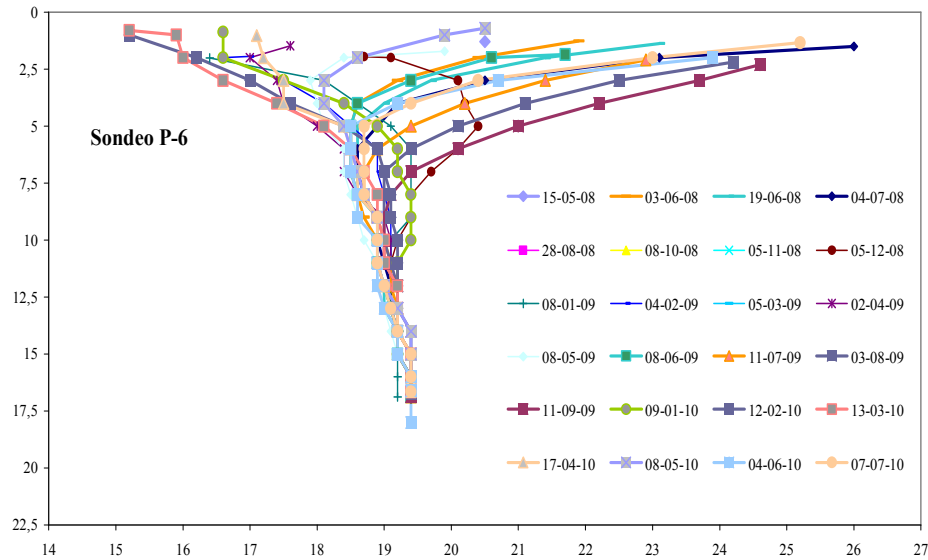


Figura 7.66. Perfiles de temperatura en profundidad del piezómetro P-6, tomados mensualmente desde mayo de 2008

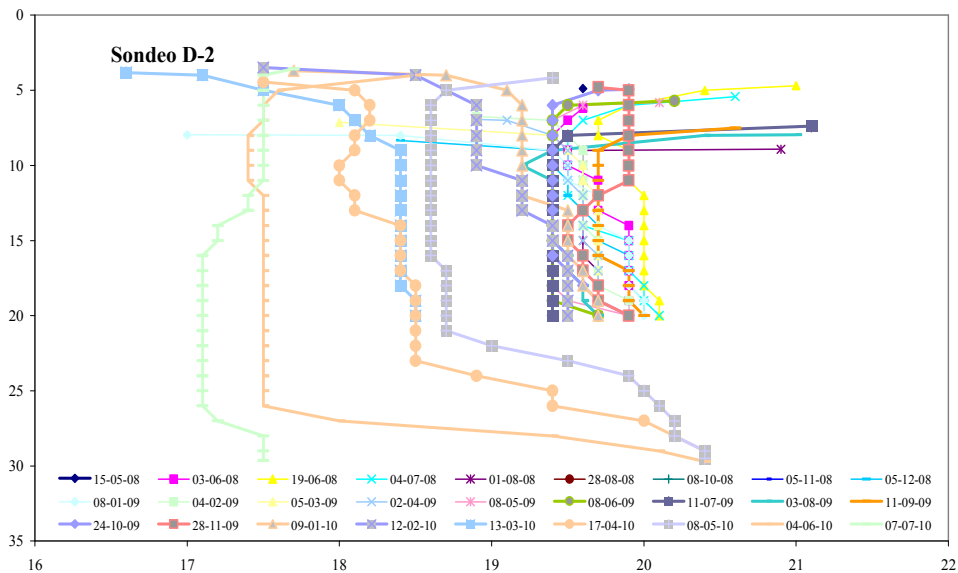


Figura 7.67. Perfiles de temperatura en profundidad del piezómetro D-2, tomados mensualmente desde mayo de 2008

En los piezómetros D-2 y P-1 se aprecia, además, el efecto del vertido de agua marina en superficie, desplazando los perfiles de temperaturas en ambos casos hacia temperaturas

inferiores próximas a las del agua de mar. El efecto es más acusado en D-2 (figura 7.67), puesto que parte del agua infiltrada procedente de los vertidos circula por el entorno de D-2 en su camino hacia los pozos de extracción de la DA-I (ver mapas de piezometría, figuras 7.17, 7.18 y 7.19). El cambio es más acusado en los metros superiores.

iv) Registros en la línea de costa

Los piezómetros situados en las proximidades de la línea de costa presentan variaciones más amplias de temperatura (figura 7.68), desapareciendo la forma de cono invertido de las gráficas. Esto se debe a la influencia del agua de mar y a sus variaciones interanuales. Pese a estar situados a la misma distancia de la línea de costa, en algunos la influencia es mayor que en otros. Esto se explica por la heterogeneidad del medio y por la presencia de fracturas, que pueden modificar localmente la conexión del acuífero con el mar. El rango de temperatura del mar en el sureste de la península a lo largo del año es de 14 a 27°C, www.aemet.es.

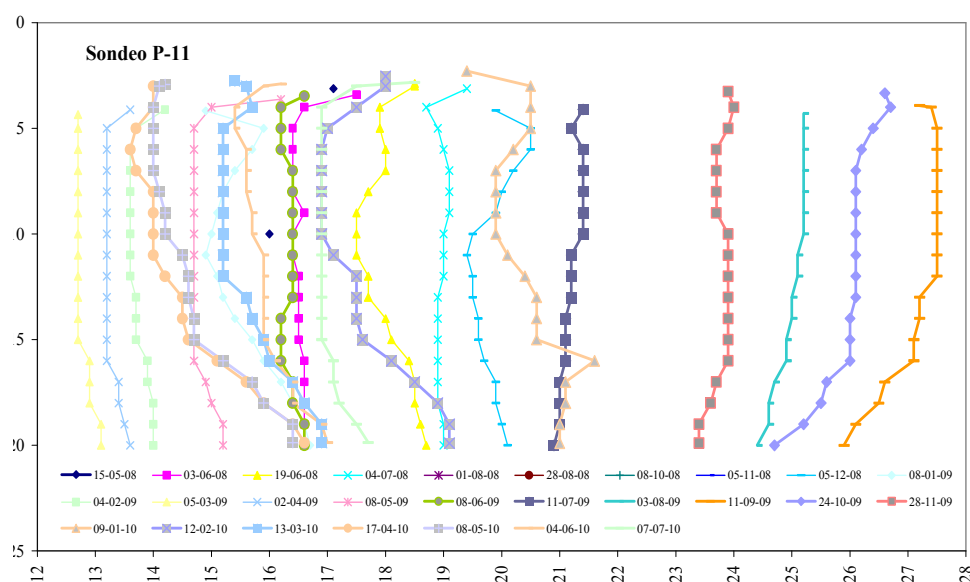


Figura 7.68. Perfiles de temperatura en profundidad del piezómetro P-11, tomados mensualmente desde mayo de 2008

Respecto a la variación temporal de la temperatura, medida a 10 m de profundidad, esta está relacionada con la estación del año en la que se realiza la medida y con el poder regulador térmico del mar, dándose los máximos termales de agosto a octubre y los mínimos de febrero a abril; tal como puede verse en el P-13 (figura 7.69), en el que el gráfico constituye una repetición de curvas cíclicas.

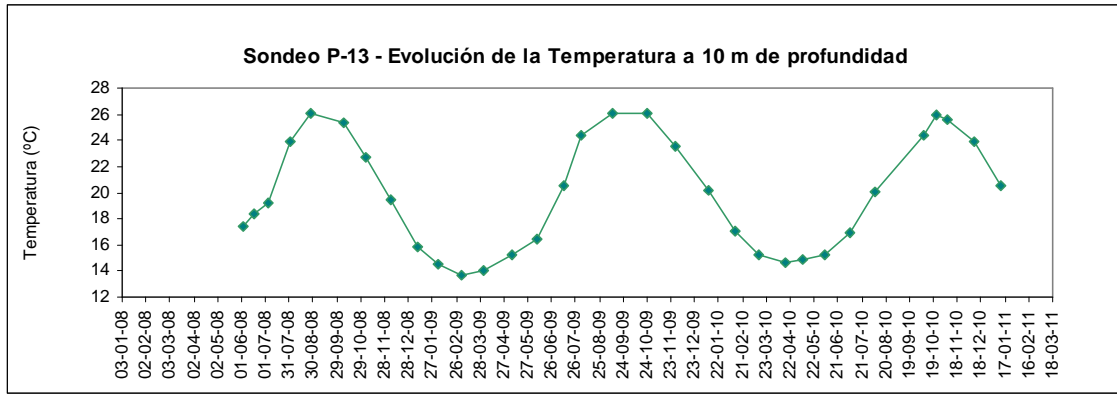


Figura 7.69. Evolución de la temperatura, a 10 m de profundidad, en el P-13

v) Registros junto a las explotaciones de la DA-I

En la figura 7.70 se presenta la variación de temperatura del pozo DI-4 a 35 m de profundidad. Las variaciones de temperatura se encuentran estrechamente relacionadas con las que experimenta el agua de mar, como ocurre con los piezómetros P-9 a P-16. Se aprecia que existe un desfase temporal entre la temperatura del agua de mar y la temperatura ambiental, fenómeno característico en las grandes masas de agua.

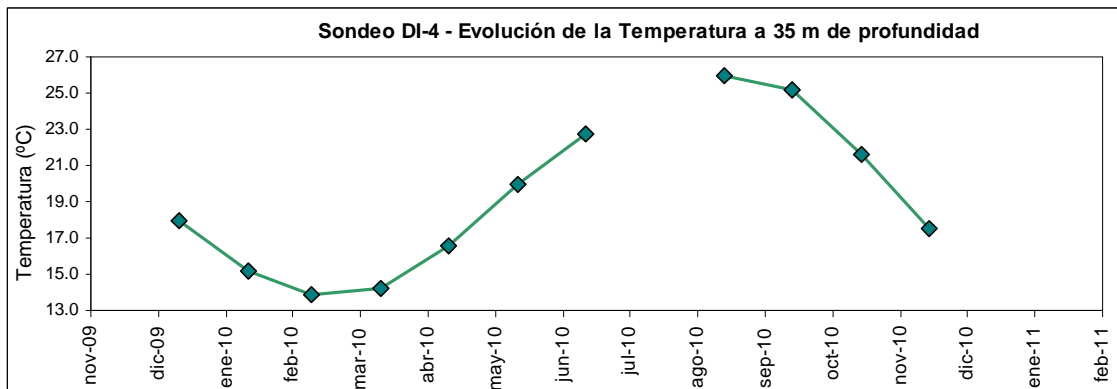


Figura 7.70. Evolución de la temperatura, a 35 m de profundidad, del pozo DI-4

7.7. BALANCE HÍDRICO

7.7.1. MODELO CONCEPTUAL

Con anterioridad (en los apartados 7.3 y 7.4) se describió la geometría y las características hidrogeológicas del acuífero superior (formado por las capas del Cuaternario y del Plioceno superior). Las condiciones de frontera están definidas por un borde de piezometría constante que se extiende desde la línea de costa hacia el mar; por un borde impermeable al norte, en la Sierra del Colmenar (margas del Plioceno inferior); por un umbral piezométrico situado al sur, paralelo a las pistas del aeropuerto; por un sustrato impermeable (margas del Plioceno inferior), y por la conexión hidráulica con los materiales cuaternarios del

Campo de Elche al oeste, de baja permeabilidad. El modelo conceptual de funcionamiento originario (sin alteraciones por bombeos) presenta un escenario en el que se produce una descarga natural desde el continente hacia el mar a través de la línea de costa del saladar; este régimen natural ha sido alterado por la acción antrópica consistente en la ubicación de captaciones a lo largo de la línea de costa para el abastecimiento de las desaladoras DA-I y DA-II, y por los vertidos de agua de mar sobre la superficie del saladar. Bajo un punto de vista hidroquímico, la salinidad de las aguas continentales del acuífero se ha visto afectada por la actividad de la industria salinera que se desarrolló durante el siglo pasado en el saladar.

En la figura 7.71 se ha representado, mediante un bloque diagrama, los términos que intervienen en el balance hídrico. Las entradas al sistema proceden de la recarga con agua de lluvia directa sobre la cuenca receptora (E_4), los volúmenes provenientes del acuífero libre del Campo de Elche por el borde occidental del acuífero (E_5), la procedente de los vertidos sobre la superficie del saladar (E_3) y la más importante, la entrada desde el mar (E_1). Existe un volumen de agua de mar captado a través de los pozos horizontales dirigidos (E_2) que no interviene en el balance pero que condiciona la naturaleza química del agua de la cántara de almacenamiento de la DA-II, ya que es en este punto donde se almacenan, las aguas procedentes del drenaje del túnel y los PHD, antes de ser bombeada a las instalaciones de la desaladora.

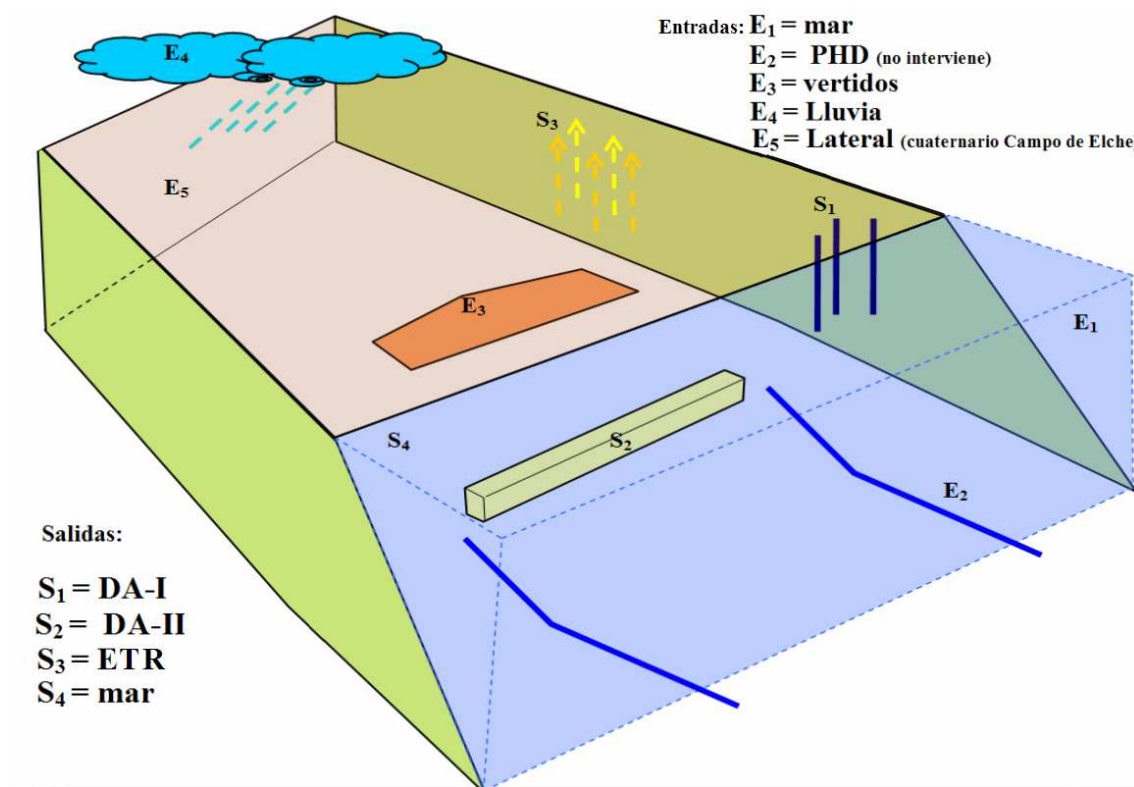


Figura 7.71. Esquema con los elementos del balance hídrico del acuífero costero de Agua Amarga

Las salidas del sistema se producen hacia el mar (S_4), hacia las captaciones del túnel de drenaje (S_2), hacia las captaciones verticales de la DA-I (S_1) y por evapotranspiración real (ETR) desde la superficie del terreno (S_3).

Los volúmenes de retornos por regadío se desestiman, pues los cultivos de la zona son mayoritariamente de secano (almendros). También existen plantaciones de cítricos, regados mediante sistemas de goteo. No hay constancia de la existencia de pozos de extracción para agricultura, a causa de la salinidad de las aguas. Casi todas las explotaciones agrícolas tienen un embalse de aguas procedentes del Trasvase Tajo-Segura a través del Canal del Progreso.

La estimación del balance se basa en el establecimiento de hipótesis plausibles a partir de los datos disponibles. Así, mientras que las extracciones de las desaladoras o los vertidos son valores bastante precisos, otros datos, como la aportación lateral desde el borde oeste del acuífero, han tenido que estimarse dentro de unos márgenes razonables. El cálculo de los términos del balance se realiza para un año promedio.

7.7.2. ENTRADAS AL SISTEMA ACUÍFERO

7.7.2.1. Recarga por infiltración de lluvia útil

Para la estimación de la recarga por infiltración de agua de lluvia, en zonas con clima Mediterráneo, se ha de realizar un balance meteorológico diario, dado el carácter torrencial de las lluvias (figura 2.4). Por otra parte, no es necesario el cálculo de la ETP diaria, ya que la sensibilidad de este parámetro es mucho menor y se obtienen resultados aceptables dividiendo el valor medio mensual por el número de días del mes (FCIHS, 2009).

El periodo de estudio corresponde con los tres años hidrológicos comprendidos entre septiembre de 2007 y agosto de 2010. Se sabe que, como norma general, se debe calcular el balance a partir de una serie suficientemente larga de tiempo (suele oscilar entre 20 y 30 años) para poder obtener conclusiones relevantes; sin embargo, el hecho de haber elegido una serie de tres años para el cálculo de la recarga por infiltración de agua de lluvia, viene justificado por las siguientes consideraciones:

- Los valores de precipitaciones anuales acumuladas de cada año hidrológico (tabla 7.9) constituyen:
 - un valor representativo de año de lluvias medias (275,6 mm para 2007-08), próximo al medio plurianual de 285 mm, calculado para una serie de 30 años (figura 2.5),
 - un valor representativo de año húmedo (382,8 mm para 2009-2010), por encima del medio plurianual de 285 mm (figura 2.5),
 - un valor representativo de año seco (198,3 mm para 2008-2009), por debajo del valor medio plurianual de 285 mm. (figura 2.5).

	Ciclo hidrológico		
	2007-2008	2008-2009	2009-2010
pp acumuladas mm	275.57	198.34	382.75

Tabla 7.9. Precipitaciones acumuladas durante los años hidrológicos 2007-2010

- El valor medio de las precipitaciones anuales acumuladas durante estos tres años hidrológicos es de 285,5 mm, coincidiendo prácticamente con el valor plurianual medio calculado para una serie de 30 años (285 mm).
- Dentro de los elementos del balance (como se verá en el apartado 7.7.4), el de infiltración es casi insignificante, en términos cuantitativos, en relación con los demás términos de entradas al acuífero.

El valor de ETP diaria, para el mismo periodo de tiempo, se obtuvo a partir del cálculo de la ETP media mensual aplicando el método de Thornwaite. Los cálculos se encuentran en el Anexo 9, mientras que en la tabla 7.10 se muestra el valor obtenido.

Ciclo hidrológico 2007-2008	ETP media mm/mes	Ciclo hidrológico 2008-2009	ETP media mm/mes	Ciclo hidrológico 2009-2010	ETP media mm/mes
sep	106.25	sep	118.75	sep	103.13
oct	71.75	oct	77.73	oct	77.73
nov	32.83	nov	27.78	nov	47.98
dic	25.63	dic	20.50	dic	30.75
ene	23.78	ene	23.78	ene	26.43
feb	27.50	feb	20.97	feb	27.96
mar	51.25	mar	38.44	mar	35.24
abr	62.70	abr	52.80	abr	56.10
may	91.62	may	103.07	may	91.62
jun	125.80	jun	140.60	jun	129.50
jul	170.31	jul	174.18	jul	178.05
ago	163.37	ago	159.74	ago	167.00
ETP anual	952.79	ETP anual	958.35	ETP anual	971.48

Tabla 7.10. Valores de pp media mensual durante los años hidrológicos 2007-2010

Los valores de ETP anual resultantes se encuentran en torno a 60 mm por encima del valor medio anual de 896 mm (figura 2.7). Los datos meteorológicos relativos a lluvias diarias y temperaturas mensuales se obtuvieron de la estación termo-pluviométrica de Al Altet, en el aeropuerto de Alicante (web: www.tutiempo.net).

La estimación de la capacidad de campo se ha hecho a partir de resultados de granulometría de los materiales del cuaternario obtenidos en los estudios geotécnicos y

mediante la expresión estimativa del "equivalente de humedad" (Porta et al., 1999 y Gardner, 1986):

$$Eqh = 0.555 (\% \text{ arcillas}) + 0.187 (\% \text{ limos}) + 0.027 (\% \text{ arenas})$$

El equivalente de humedad (Eqh) es numéricamente igual a la capacidad de campo y varía, según las muestras estudiadas, entre el 15 y 20 %. El espesor de suelo varía entre 15 y 20 cm, según testigos geotécnicos de los sondeos (informes internos de la MCT). El valor real del punto de marchitez permanente depende del tipo de vegetación y de la salinidad del suelo y se debe calcular mediante ensayos de campo y laboratorio. Según Porta et al. (1999), para un horizonte de suelo antropizado (tipo Ap) de espesor entre 0 y 30 cm, el punto de marchitez permanente puede situarse en torno a 10 %. La reserva útil se obtiene de la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, mientras que la reserva inicial se considera nula, ya que los meses de julio y agosto son los menos lluviosos de todo el año (figura 2.4).

Para el cálculo de la infiltración durante el periodo 2007-2010, se ha utilizado la hoja de cálculo EASY_BAL, versión 2.0; no se incluyen valores de laminación, ya que se considera que toda el agua caída en la zona se infiltra o se evapora, puesto que el saladar constituye una zona cerrada que no presenta una salida superficial al mar. El resumen de los valores de infiltración mensual se encuentra en el Anexo 10, mientras que la tabla 7.11 muestra los valores anuales.

Capacidad de Campo %	Espesor de suelo m	Punto de marchitez permanente %	Reserva útil mm	Reserva inicial mm	Recarga año hidrológico (mm)			
					2007-2008	2008-2009	2009-2010	Valor medio de recarga anual
15	0.15	10	7.5	0	83,5	42,4	98,3	74,7
20	0.20	10	20	0	44,0	26,0	73,4	47,8

Tabla 7.11 Valor de recarga en función de los porcentajes de agua en el suelo estimados

La superficie sobre la que se produce la recarga directa de agua de lluvia es de 10 km², a la que hay que descontar el área correspondiente a los barrancos de la Sierra del Colmenar cuyas aguas son recogidas directamente por el colector de la Ciudad de la Luz, y que supone una extensión de 2 km². De este modo, la recarga media anual procedente de agua de lluvia sobre la superficie del acuífero de Agua Amarga, producto del área de la cuenca (8 km²) y el valor medio de recarga anual por infiltración de la tabla 7.11 (60 mm), se sitúa en torno a 0,48 hm³/año. Calculado de otra manera, suponiendo un coeficiente de infiltración para la zona del 10% (MCT-MMA y U.T.E., 2005) y para un valor de precipitación media anual de 285 mm, tendríamos una recarga por agua de lluvia de 0,23 hm³/año, valor más conservativo.

7.7.2.2. Aportación lateral subterránea desde acuíferos continentales

De las líneas isopiezas resultantes de las campañas de 2004 y 2005 y de los registros piezométricos de los pozos abandonados P-30 y P-31 correspondientes a enero de 2011, se ha estimado un gradiente hidráulico al oeste del saladar del 6‰ para el acuífero superior. Éste es el dato más fidedigno a partir del cual se pueden trabajar las hipótesis acerca del valor de recarga procedente del acuífero libre del Campo de Elche. La hipótesis que se propone es la de aplicar la ley de Darcy a una sección de acuífero de longitud 1,3 km y dirección norte-sur, comprendida entre el relieve de la Sierra del Colmenar y las pistas del aeropuerto, y situada a 3 km de la línea de costa. Esta sección cortaría las capas de acuífero del Cuaternario y Plioceno superior a lo largo de un área de 39000 m² y 65000 m² respectivamente, suponiendo un espesor medio de 30 m para el Cuaternario y de 50 m para el Plioceno. Se ha tomado como valores medios de conductividad hidráulica 0,8 m/d para el cuaternario y 45 m/d para el Plioceno, (tabla 7.1). Aplicando la ley de Darcy a esta sección, teniendo en cuenta que el espesor saturado de cuaternario se situaría en torno a 10 m, el volumen de entrada en el acuífero libre de Agua Amarga sería de 7,12 hm³/a. Este valor se encuentra por debajo del estimado por otros métodos en el informe MCT-MMA y U.T.E. de 2005, para el que se valoró esta recarga lateral en 10 hm³/a.

7.7.2.3. Vertidos de agua de mar al saladar

Los volúmenes vertidos durante el periodo diciembre de 2009 a julio de 2010 se exponen en la siguiente tabla

Volúmenes mensuales m ³				
Fecha	Z.H.-1	Z.I.	Z.H.-2	Total
dic-09	89294	48706	0	138000
ene-10	97680	47520	0	145200
feb-10	25600	32000	0	57600
mar-10	9600	14400	0	24000
abr-10	0	28800	0	28800
may-10	44089	18992	76561	139642
jun-10	149400	0	0	149400
jul-10 *	54000	0	0	54000
TOTAL	469663	190418	76561	736642

* datos hasta 15 de julio

Tabla 7.12. Volúmenes de riegos aplicados sobre la superficie del Saladar de Agua Amarga durante el periodo diciembre de 2009 a julio de 2010

El total de volúmenes vertidos durante dicho periodo (240 días aproximadamente) es de 7361642 m³ (1,12 Hm³/a)

7.7.2.4. Entradas desde el mar

Las entradas desde el mar, si bien se sabe que suponen la mayor parte del volumen extraído por las captaciones, son difíciles de cuantificar. Los balances de cloruros no se pueden efectuar debido a la fuente adicional de sales en las aguas que circulan bajo el saladar. Mientras que el contenido en cloruros en muestras del agua subterránea situadas al oeste del saladar y en agua de mar se puede establecer a partir de los análisis químicos, la cantidad de cloruros aportada por el saladar no se puede determinar, ya que depende del punto de muestreo. En definitiva, las aportaciones de sal a las aguas subterráneas desde el suelo del saladar dependerán de la distribución de sal y del tiempo de contacto del agua con la misma, que estará muy ligado a la variación espacial de la permeabilidad (justificaciones expuestas en el apartado 7.6.1). Por otra parte, en la cántara de almacenamiento de la DA-I, también existe mezcla con las aguas del acuífero inferior, cuya salinidad, aunque se sepa que probablemente sea mayor que la del agua de mar, no se ha concretado.

El balance de masas utilizando la caracterización isotópica puede arrojar algo de luz, aunque haya que asumir ciertas hipótesis. Las características isotópicas de los términos del balance se exponen en la tabla 7.13.

Término representado	Muestra	δD (‰)
A) Agua continental	P-3 (Piezómetro continente)	$\delta DA = -33.8$
B) Agua de mar	Agua de mar	$\delta DB = 6.9$
C) Mezcla en DA-I	Cántara DA-I	$\delta DC = 2.1$
D) Mezcla en DA-II	Cántara DA-II	$\delta DD = 6.6$

Tabla 7.13. Datos para la realización del balance de masas a partir de desviación isotópica con Deuterio

El balance para la DA-I se ha realizado bajo la hipótesis de que la desviación isotópica del agua del acuífero inferior es idéntica a la del acuífero superior. La ecuación de balance sería:

$$\delta DA (a) + \delta DB (b) = \delta DC (a + b); a + b = 45,9 \text{ hm}^3/\text{a}$$

siendo a y b los volúmenes del continente y del mar respectivamente.

Según estos cálculos, el volumen aportado desde el mar sería de $40,5 \text{ hm}^3/\text{a}$ (88,2%) mientras que el procedente del continente tan solo de $5,4 \text{ hm}^3/\text{a}$ (11,8%). Suponiendo que la relación agua de mar/agua continental fuera la misma para las captaciones del acuífero inferior que para las captaciones del acuífero superior, aplicando el tanto por ciento de volumen captado en cada acuífero (72% para el superior), se estimaría una entrada en el acuífero superior de $29,2 \text{ hm}^3/\text{a}$ de agua de mar y de $3,9 \text{ hm}^3/\text{a}$ de agua continental.

De la misma manera se procedería en el caso de la DA-II. La hipótesis de partida asumiría que el caudal potencial aportado por el drenaje en el túnel sería constante en el tiempo y de valor 18,9 hm³/a (valor sobreestimado, según mencionamos más arriba). El volumen aportado por los PHD sería de 10,3 hm³/a, que resultaría de restar al volumen medio anual explotado por la DA-II durante el periodo septiembre de 2008/diciembre de 2009 (29,2 hm³) el drenaje del túnel. Con estos datos, se plantearía el siguiente balance isotópico de masas:

$$\delta DA(a) + \delta DB(b + 10,3) = \delta DD(a + b + 10,3); a + b + 10,3 = 29,2 \text{ hm}^3/\text{a}$$

siendo a y b los volúmenes del continente y del mar, respectivamente, captados desde el acuífero.

Según estos cálculos, el volumen aportado desde el mar hacia el túnel sería de 18,7 hm³/a (98,9%), mientras que desde el continente tan solo se aportarían 0,2 hm³/a (1,1 %). Por tanto, el volumen de entrada de agua de mar hacia el acuífero superior, estimado a partir del balance isotópico de masas con deuterio, sería de 47,9 hm³/a.

7.7.3. SALIDAS DEL SISTEMA ACUÍFERO

7.7.3.1. Extracciones desde las desaladoras DA-I y DA-II

El volumen medio anual extraído por los pozos de la DA-I entre marzo de 2010/enero de 2010 es de 45,96 hm³/a, periodo durante el cual las extracciones parecen haberse estabilizado (figura 5.3). De este volumen, sólo el bombeado en los pozos de 50 y 100 m de profundidad, es captado desde el acuífero superior, ya que los pozos de 150 m están sellados como mínimo los primeros 50 m. La tabla 7.14 muestra los volúmenes netos extraídos por cada grupo de pozos de distinta profundidad entre los años 2006 y 2009, de acuerdo con la información proporcionada por la MCT y el porcentaje en relación con el volumen total.

	Pozos 50 m	Pozos 100 m	Pozos 150 m
Volumen de agua extraída durante el periodo 2006-2009 m ³	89470829	37371119	48473893
% Total	51	21	28

Tabla 7.14. Volumen de agua extraída por el conjunto de los pozos de la DA-I durante el periodo 2006-2009, en función de la profundidad de los mismos

Por tanto, del volumen medio anual extraído, 33.1 hm³/a (72 %) corresponde al de los pozos que captan agua desde el acuífero superior.

En el caso de la DA-II, en dos aforos realizados en mayo de 2008 y en enero de 2009, durante una parada de la desaladora y del bombeo de los PHD, se midió el caudal de drenaje

de los 112 pozos inclinados ubicados en el túnel y en la base de las cántaras de almacenamiento, obteniéndose valores de 638 l/s y 555 l/s, respectivamente, que corresponden a un valor medio aproximado de $18,9 \text{ hm}^3/\text{a}$. Estos volúmenes potenciales proceden del acuífero superior, donde está ubicado el túnel. Como se comentó al final del Capítulo 6, se trata de un dato sobreestimado, ya que la cantidad de agua que entra en la cántara está condicionada por el nivel de agua dentro de la misma, que a su vez depende del agua procedente de los PHD cuando están en funcionamiento, y por el nivel piezométrico del acuífero. Si el nivel dentro de la cántara se estabiliza y coincide con el nivel piezométrico en el acuífero, entonces no se produce drenaje. En una situación extrema, si el nivel en la cántara corresponde con el nivel en el acuífero, y se siguiera bombeando agua desde los PHD, entonces las perforaciones del túnel actuarían como inyectoras de agua en el acuífero, para aliviar el exceso de carga hidráulica provocado por la recarga desde los PHD.

7.7.3.2. Salidas al mar

En el mapa de isopiezas de la figura 7.23, se observa que en el sector costero meridional las isopiezas indican que existe una salida al mar. Si se tiene en cuenta que la longitud de descarga es de aproximadamente 1000 m, que el gradiente es del 3,3 por mil y que la transmitividad de las calcarenitas del Tirreniense (de 60 m de espesor) es de $4200 \text{ m}^2/\text{d}$ de media (tabla 7.1), según la ley de Darcy, la salida al mar en este sector se cifra en $4,6 \text{ hm}^3/\text{a}$.

7.7.4 BALANCE HÍDRICO RESULTANTE

En la tabla 7.15 se muestran los valores adjudicados a cada término del balance hídrico del acuífero superior de Agua Amarga para un año medio, considerando los vertidos y que las desaladoras se encuentran en régimen de explotación, a partir de los datos estimados con anterioridad y suponiendo que el acuífero se encuentra en régimen permanente (no hay almacenamiento), con el conjunto de las extracciones funcionando a ritmo constante.

El balance está equilibrado ya que estamos ante un acuífero en régimen permanente, donde el mar suministra los caudales extraídos merced a los elevados valores de transmisividad.

En el caso de que se produjera una parada de las extracciones, alterándose el régimen estacionario alcanzado, parte del volumen calculado de descarga hacia el mar se invertiría en la recuperación de los niveles piezométricos. Este volumen, para un descenso medio generalizado de 5 m, una porosidad eficaz media de 0,12 y un área de 2500 m^2 , se estima en $1,5 \times 10^{-3} \text{ hm}^3$. Se trata de un valor sobreestimado, ya que parte del agua que reestablecería los niveles piezométricos procedería del mar.

		Entradas (hm ³ /a)	Salidas (hm ³ /a)
Lateral		7,12	
Infiltración de lluvia útil		0,48	
DA-I 33,1 hm ³ /a*	mar (a)		29,2
	continente		3,9
DA-II 18,9 hm ³ /a**	mar (b)		18,7
	continente		0,2
Mar		47,9 (hacia captaciones, suma a y b)	
Vertidos***		1,12	
Salidas al mar zona sur			4,6
Total		56,6	56,6

*volumen del acuífero superior (72% del total)

**sin contar los PHD

***suponiendo que la recarga se mantiene un año

Tabla 7.15. Cuantificación de los términos del balance hídrico considerando los valores de recarga mínimos

Para valorar estos resultados se han de tener en cuenta algunas consideraciones sobre el balance:

- El volumen de extracción de la DA-II ha disminuido desde enero de 2010, a un valor medio de 8,74 hm³/a, por lo que la descarga hacia el mar durante ese año debe ser mayor.
- Si bien la recarga procedente de infiltración directa sobre la superficie del acuífero apenas interviene en los resultados finales, el valor de recarga lateral debe oscilar en función de las lluvias, ya que ésta procede del acuífero del Campo de Elche que se encuentra a su vez condicionada por las lluvias. Las posibles aportaciones desde acuífero inferior Messiniense también estarían condicionadas por las fluctuaciones de las lluvias, aunque en este estudio no se consideran.
- Se asume que los vertidos sobre el saladar se mantienen durante todo un año, con una aportación mensual media igual a la realizada durante el periodo diciembre de 2009/julio de 2010. Es una cantidad sobreestimada, ya que el programa de riegos no prevé mantener los mismos caudales de vertido, sino más bien espaciarlos en el tiempo.
- Existe un aumento de espesor en las areniscas del Plioceno y de las calcarenitas del Tirreniense de norte a sur, donde el acuífero es por tanto más transmisivo. Esto podría explicar el porcentaje aparentemente alto de la fracción de agua continental que descarga hacia el mar.

Del análisis del balance se deduce lo siguiente:

- Las captaciones de las desaladoras de Alicante extraen principalmente agua de mar a través del acuífero costero de Agua Amarga. Los porcentajes calculados son: 88,2 % de agua de mar en la DA-I (incluyendo las captaciones de 150 m) y 98,9 % en la DA-II (sin considerar los volúmenes aportados por los PHD).
- La descarga de agua continental desde el acuífero superior hacia las captaciones se estima en torno a 4,1 hm³/a.
- La descarga de agua continental hacia el mar se sitúa en torno a 3,5 hm³/a (sin considerar vertidos, incluyendo estos sería de 4,6 hm³/a) y se produciría principalmente en la zona sur del saladar.

CAPÍTULO 8

CARACTERIZACIÓN DE ESCENARIOS DE INTRUSIÓN CON SALADARES CERCANOS MEDIANTE FATSIM-A Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ESCENARIO DEL SALADAR DE AGUA AMARGA CON SEAWAT

CAPÍTULO 8

8. CARACTERIZACIÓN DE ESCENARIOS DE INTRUSIÓN MARINA CON SALADARES CERCANOS MEDIANTE FATSIM-A Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ESCENARIO DEL SALADAR DE AGUA AMARGA CON SEAWAT

8.1. INTRODUCCIÓN

La simulación es asumida por la comunidad científica, hoy día, como una tarea casi imprescindible a pesar de que requerir, en general, una gran simplificación del escenario real. Las ventajas que supone disponer de un modelo numérico que permita deducir y/o predecir el comportamiento del sistema ante posibles intervenciones externas, al mismo tiempo que su aplicación como instrumento de gestión, compensan el trabajo realizado. En el escenario que nos ocupa, con intervención antrópica (existencia de un saladar asociado a una antigua explotación salinera, captación de aguas subterráneas y vertidos para la recuperación del humedal) e intrusión marina, la elaboración de un modelo es casi imprescindible para comprender los complejos procesos físicos que se dan bajo su superficie.

El objetivo, no obstante, no puede ser demasiado ambicioso debido al fuerte grado de incertidumbre de la mayoría de los parámetros hidrológicos, geométricos y de condiciones de contorno, definidos en el Capítulo 7; en particular, la aportación lateral desde el acuífero del Campo de Elche, la desconexión con el acuífero inferior del Messiniense y la asunción de un umbral piezométrico permanente al sur del saladar. En consecuencia, la elaboración del modelo pretende obtener información cualitativa, y en menor grado cuantitativa, de los patrones de flujo y concentración que resultan en cada uno de los escenarios y periodos en que se ha dividido la cronología de acontecimientos: estadio natural previo a las intervenciones antrópicas (inferido a partir de los datos disponibles), escenario tras la explotación salinera, ídem asociado a las captaciones de las desaladoras y escenario ligado a los vertidos de recuperación.

La herramienta numérica usada es el programa MODFLOW (2007) y su módulo SEAWAT de flujo y transporte elaborado por el United State Geological Survey. Como interfase de comunicación se ha usado programa Visual Modflow Professional, versión 4.2

(www.waterloohydrogeologic.com), licenciado por el grupo de investigación ‘simulación por redes’ de la UPCT.

Como complemento a la simulación, y desarrollado al principio del capítulo, se presenta el estudio de la caracterización física de escenarios 2-D de intrusión marina con saladares cercanos, siguiendo una técnica típica de adimensionalización discriminada de las ecuaciones de gobierno. La complejidad de este estudio no ha permitido ser abordado hasta hoy en la literatura científica por el enorme número de parámetros hidrogeológicos, geométricos y de condiciones de contorno que intervienen en el problema. La discriminación, sin embargo, permite abordar este estudio con resultados satisfactorios y cualitativamente diferentes a los que se obtendrían siguiendo un proceso clásico (lo que se ha demostrado ya para problemas sólo de intrusión salina, Alhama et al. (2010c, 2010d y 2010i). La confirmación de los resultados obtenidos (para lo que se han requerido numerosas simulaciones) se ha llevado a cabo mediante el programa FATSIM-A (Alhama et al., 2010g y 2010h) desarrollado en especial para este propósito y con las características más interesantes de los modernos programas de simulación: entorno ameno de ventanas (bajo window) para la comunicación con el usuario, posibilidades de multiprogramación, visualización parcial de resultados, representaciones gráficas avanzadas y potentes, representación de animaciones, etc. FATSIM-A –cuyos derechos de explotación se han cedido a la UPCT– hace uso de modelos ya verificados y contrastados en la literatura científica (Soto et al., 2007a), lo que asegura la fiabilidad de los resultados. Una introducción al programa se presenta en este capítulo.

8.2. CARACTERIZACIÓN DE ESCENARIOS, 2-D, DE INTRUSIÓN MARINA CON SALADARES CERCANOS

Caracterizar un escenario de intrusión consiste en investigar los grupos adimensionales que definen sus patrones de isolíneas de concentración y flujo, grupos formados por combinaciones de los parámetros geométricos y físicos que intervienen en el problema hidrogeológico. La búsqueda de estos grupos reduce enormemente la tarea del investigador ya que el número de ellos suele ser, en general, bastante inferior al número de parámetros del problema.

8.2.1. FLUJO DE DENSIDAD VARIABLE CON TRANSPORTE DE SOLUTO

Cuando los patrones de flujo de un fluido se deben a cambios de densidad en el mismo, con independencia de la causa de estos cambios (concentración en el problema que nos ocupa), decimos que se trata de un ‘flujo asociado a densidad variable’, ‘flujo de densidad variable’ o ‘flujo inducido por flotación’. Así, la flotación es una fuerza asociada a las diferencias de densidad en el seno de un campo gravitatorio. Si se trata de un flujo

estacionario, el patrón derivado del campo de densidades depende de la posición, mientras que para un flujo transitorio dicho patrón depende de la posición y del tiempo. Hablamos de medios porosos cuando se da la coexistencia de una fase fluida y una sólida que permite la circulación del fluido en su seno (la fase sólida está en reposo o mantiene una velocidad despreciable en comparación con la del fluido). El flujo entre los intersticios de este medio es debido a cambios de la densidad del fluido, ρ_f , que a su vez es función de la temperatura, la salinidad y en mucho menor grado de la presión. La dinámica de estos fluidos, en contraposición a la de los fluidos que llenan todo el espacio o fluidos libres, se ajusta bien en general a la ley de Darcy (1856).

Flujo y densidad están fuertemente acoplados en el proceso por lo que los patrones instantáneos o estacionarios del problema dependen simultáneamente de ambas variables, la última de las cuales se formula en función de la concentración, de la que depende esencialmente. Con todo, la concurrencia de cambios espaciales y temporales de la concentración salina no es suficiente para clasificar el patrón de flujo como ‘flujo de densidad variable’ pues su efecto puede ser despreciable en comparación con el debido a otras causas (principalmente definidas por las condiciones de frontera del dominio como, por ejemplo, la velocidad del flujo subterráneo o flujo regional). Sin embargo, puede darse una situación en donde pequeñas diferencias en la densidad induzcan patrones de flujo completamente diferentes a los que se darían si el fluido tuviera densidad constante (convección libre).

8.2.1.1. Propiedades del agua

El flujo inducido por flotación puede ser favorecido o desfavorecido cuando cambian las variables del fluido que influyen en la densidad: temperatura, salinidad y presión. Esta influencia, en general compleja, hace que en la mayor parte de las investigaciones se simplifique el estudio asumiendo ciertas hipótesis respecto de una o más de las citadas variables. Para la influencia de la temperatura en la densidad puede consultarse las referencias de Bejan (1987) y Yusa y Oishi (1989), mientras que su influencia en la viscosidad puede encontrarse en Jap. Soc. Mech. Eng (JSME, 1968). Otras dependencias como la influencia de la presión en la densidad y la compresibilidad pueden verse en INTRAVAL (1991) y Joseph (1976), respectivamente.

La concentración salina se da en unidades físicas que relacionan la proporción de: i) masa de soluto en el fluido (kg/kg), ii) masa de soluto por unidad de volumen de fluido (mg/l o g/m³), o iii) masa de soluto por unidad de masa de fluido (ppt, partes por tonelada; ppm, partes por millón; ppb, partes por billón). El cambio de unidades de una clase a otra requiere conocer la densidad del fluido. Si se trata de agua dulce, $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$, $1 \text{ mg/l} = 1 \text{ ppm}$. La concentración de sal se mide indirectamente a través de la conductividad eléctrica, cuya

unidad más común es $\mu\text{S/cm}$. Para aguas saladas, Grohman (1987) y Holzbecher (1998) establecen las siguientes relaciones entre conductividad y concentración:

$$ce(\mu\text{S/cm}) = 5,48 + 1,43 c \text{ (mg/l)} \quad (\text{Grohman}) \quad (8.1)$$

$$c \text{ (mg/l)} = -3,83 + (0,699) ce \text{ (}\mu\text{S/cm)} \quad (\text{Holzbecher}) \quad (8.2)$$

La tabla 8.1 reproduce las categorías del agua en función del TDS ('total dissolved solids'), de acuerdo con Freeze y Cherry (1979); TDS es otra unidad para la concentración global y se refiere a la medida de los sólidos disueltos totales. Tibbals (1990) establece dos categorías de agua salada: agua débilmente salina entre $1\div 3\text{E}3$ mg/l y agua moderadamente salada entre $3\div 1\text{E}4$ mg/l. Las aguas con salinidad superior a $3,5\text{E}4$ mg/l suelen clasificarse como salmuera (agua saturada de sal). Con todo, la clasificación del agua en lo concerniente a la salinidad depende del fin para el que va a ser usada. Como ejemplo, el agua del mar cuya densidad es de 1025 kg/m^3 , tiene una baja concentración en comparación con la salmuera que puede llegar a densidades de 1350 kg/m^3 (Reilly y Goodman, 1985). Pero para usos comunes incluso el agua del mar es demasiado salada y no puede emplearse para regadío (ya que la mayor parte de los cultivos no toleraría ni siquiera agua débilmente salina), ni para el consumo humano ni para uso industrial debido a sus efectos corrosivos.

Categoría	TDS (mg/l)
Agua Dulce	$0\div 1\text{E}3$
Agua salobre	$1\text{E}3\div 1\text{E}4$
Agua de mar	$1\text{E}4 \div 1\text{E}5$
Salmuera	$>1\text{E}5$

Tabla 8.1. Clasificación del agua en función de la concentración salina

En relación con la influencia simultánea de la temperatura y la concentración en la densidad, Stuyfzand (1989) nos proporciona la expresión siguiente en términos de la fracción de masa en TDS (c_m) y la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ (T)

$$\rho = 1000 \cdot \left(1 + 0,805 c_m - 6,5 \cdot 10^{-6} (T - 4 + 220 \cdot c_m)^2 \right) \quad (8.3)$$

La densidad del agua del mar se encuentra generalmente dentro del rango 1022 a 1028 kg/m^3 (Reilly y Goodman, 1985). El valor medio es de 1025 kg/m^3 . Si se asume una dependencia lineal de la salinidad con la densidad, el coeficiente apuntado por Ségol (1994) es 700 kg/m^3 , mientras que Cussler (1984) sugiere un coeficiente de 756 kg/m^3 . Helber et al. (1988) apuntan que las expresiones de la densidad de una mezcla de fluidos de densidades ρ_o y ρ_s , en términos de la fracción de masa c_m , pueden ajustarse bien para todo el rango de solubilidades (desde cero hasta el 26%, límite de solubilidad) por las expresiones

$$\rho^{-1} = (1 - c_m) \rho_0^{-1} + c_m \rho_s^{-1} \quad \text{y} \quad \rho = \rho_0 \left(\frac{\rho_s}{\rho_0} \right)^{c_m} \quad (8.4)$$

Para el soluto no reactivo cloruro sódico, a temperatura de 20 °C, la concentración (kg/kg) varía desde 0 (agua dulce) hasta 0,26 (agua saturada), Holzbecher (1998) y James y Lord (1992). El agua del mar tiene una concentración de 0,03484 kg/l, llegando a 40 en el Mediterráneo.

En relación con la influencia de la salinidad en la viscosidad, Cordier y Goblet (1991) proporcionan una dependencia de la viscosidad dinámica con la fracción de masa de la forma

$$\mu = \mu_0 \left(1 + 1,85 c_m - 4,1 c_m^2 + 44,5 c_m^3 \right) \quad (8.5)$$

donde $\mu_0 = 0,001002$ Pa·s es la viscosidad del agua dulce. Una aproximación más precisa (si el agua contiene menos de 15 mol/l de iones disueltos y sus iones presentes son exclusivamente Na^+ y Cl^-) es la de Olague et al. (1991); para estos autores la viscosidad de un fluido que contiene N sólidos disueltos puede ser aproximada por la expresión

$$\mu = \mu_0 \left(1 + 0,08 \cdot c(\text{Na}^+) \right) \quad (8.6)$$

8.2.1.2. Ecuaciones de gobierno

Los procesos físicos que conducen a las ecuaciones de gobierno son la ley de Darcy que define el llamado flujo regional, la convección asociada a los cambios de densidad, la difusión asociada a los cambios de concentración y la dispersión dependiente de la velocidad y de la porosidad.

Flujo regional. El agua subterránea se desplaza por la influencia de la gravedad o debido a cambios de presión desde las zonas de recarga hacia las zonas de descarga. Los mapas de estos flujos están representados por la altura piezométrica (potentiometric head) h (m), una variable relacionada con la presión local p (Pa), por la expresión

$$h(p) = \frac{p}{\rho g} - z \quad (8.7)$$

donde g (m/s^2) es la aceleración de la gravedad, ρ (kg/m^3) es la densidad del fluido y z (m) es la altura respecto de una referencia, Kolditz et al. (1998).

La altura piezométrica es una variable más fácil de medir en campo que la presión, de ahí la preferencia de trabajar con esta variable. Sin embargo, en fluidos donde la densidad es variable, trabajar con la altura piezométrica es más engorroso ya que es preciso medir la densidad local para evaluarla. Esto ha conducido a la definición de ‘altura piezométrica equivalente de agua dulce’ (equivalent freshwater head), h_{er} (m) cuya relación con la presión de acuerdo con Holzbecher (1998) es

$$p = \rho_0 g h_{ef} \quad (8.8)$$

donde ρ_0 es la densidad del agua dulce. Muchos hidrogeólogos encuentran más fácil conceptualmente trabajar con la variable h_{ef} que con la presión, Narayan y Armstrong (1995). A partir de aquí, en esta memoria, el significado de la altura h será el de h_{ef} .

La ley de Darcy (1856) que describe el movimiento de agua subterránea (en medios porosos), una relación empírica que muchos autores han tratado de deducir mediante las leyes de la dinámica de fluidos (Bear, 1972), aunque ha sido objeto de discusión por muchos autores acerca de su idoneidad, lo cierto es que la mayor parte de los programas de flujo de agua subterránea están basados en ella. En suma esta ley expresa la conservación del momento lineal de un fluido en un medio poroso, Georgiadis y Catton (1988), Nield y Bejan (1992) y Hassanizadeh y Leijnse (1988). En términos de la presión, se enuncia de la forma (Holzbecher, 1998)

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho \mathbf{g}) \quad (8.9)$$

donde \mathbf{q} (m/s) es la llamada velocidad de Darcy o flujo de Darcy (diferente a la velocidad del fluido en los poros) producto de la velocidad del fluido, \mathbf{v} (m/s), por la porosidad ϕ , k (m²) es la matriz de permeabilidad y μ (kg m⁻¹s⁻¹) la viscosidad dinámica. La ecuación de Darcy expresada en términos de la altura piezométrica equivalente de agua dulce se obtiene sustituyendo (8.8) en (8.9), Diersch (1996):

$$\mathbf{q} = -K \left(\nabla h - \frac{\rho}{\rho_0} \mathbf{g} \right) \quad (8.10)$$

donde h representa la altura piezométrica equivalente y K (m/s) es la conductividad hidráulica

$$K = \frac{k \rho_0 g}{\mu} \quad (8.11)$$

El flujo de agua subterránea local es un flujo de tipo advectivo o convectivo (arrastre), inducido por las condiciones de contorno: altura piezométrica constante, flujo constante, recarga o extracción (bombeo); algunas veces es referido como flujo de convección forzada, Holzbecher y Yusa (1995).

Convección inducida por cambios de densidad. La ecuación de Darcy, (8.9) o (8.10) contiene un término asociado con la densidad del fluido, la cual depende de la concentración de soluto. Si la densidad del fluido situado por arriba es superior a la del fluido de abajo, el fluido superior tiende a descender originándose la creación de celdas de convección en las que el fluido está continuamente recirculando, Raffensperger y Vlassopoulos (1999), Wooding et

al. (1997) y Simmons et al. (1999a y b). Este movimiento del fluido es referido también como convección natural o libre, Holzbecher y Yusa (1995).

Difusión y dispersión. La difusión molecular, proceso muy lento que tiene influencia en el patrón de flujo cuando las velocidades son pequeñas, está causada por el movimiento aleatorio (browniano) de los iones en el seno del fluido. Para velocidades más grandes la difusión cede su influencia a la dispersión hidrodinámica, proceso asociado a la existencia de un medio poroso. Se trata de un efecto a pequeña escala que surge en el recorrido del fluido entre poros. La tensión superficial, la tortuosidad y otros efectos hacen que el fluido se mezcle más rápidamente cuanto mayor es su velocidad. El conjunto de estos efectos a nivel de poro se agrupan en la llamada dispersión hidrodinámica por lo que su descripción matemática no puede ser de detalle, razón por la que existe mucha discusión en la literatura científica en cuanto a la mejor forma de definir \mathbf{D} , el tensor que aglutina los efectos de difusividad molecular y dispersividad hidrodinámica. La expresión más general para \mathbf{D} es la de Scheidegger (1961) y Bear (1972), que ha sido adoptada por muchos de los programadores de códigos como Voss (1984), ACRI (1994), Diersch (1996) y Holzbecher (1998). Estos autores definen \mathbf{D} en la forma

$$D_{ij} = [D_m + \alpha_T |\mathbf{v}|] \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{|\mathbf{v}|} \quad (8.12)$$

donde D_m es la difusividad molecular, α_T y α_L las dispersividades transversal y longitudinal, respectivamente, $\mathbf{v} = (v_1, v_2)$ la velocidad del fluido y δ_{ij} la función delta de Kronecker, ($\delta_{ij} = 1$ para $i=j$, $\delta_{ij} = 0$ para $i \neq j$). Para flujos 2-D el rango de los subíndices i y j es de 1 a 2.

Otros procesos. Para facilitar el estudio numérico se consideran despreciables algunos procesos. Por ejemplo, el impacto de la temperatura en la densidad fluido (en otras situaciones un efecto predominante), que se estima muy inferior al impacto de la concentración salina. Si, de acuerdo con Holzbecher (1998), la densidad del agua varía con la temperatura T , en grados Celsius, según la expresión

$$\rho(T) = 1000 \left(1 - \frac{(T - 3,98)^2 (T + 283)}{503570(T + 67,26)} \right) \quad (8.13)$$

los cambios de densidad son inferiores al 1% para un rango de temperaturas de 0 a 40°C.

La influencia de la presión en la densidad es un efecto aún mucho menor que el de la temperatura. De acuerdo con INTRAVAL (1991) y Holzbecher (1998), esta dependencia puede expresarse en la forma

$$\rho(p) = \rho_0 \exp[4,5 \cdot 10^{-10} (p - p_0)] \quad (8.14)$$

Otras influencias generalmente despreciables son las de la temperatura y la concentración en la viscosidad, hipótesis quizás demasiado estrictas. De acuerdo con Holzbecher (1998), estas dependencias (con la temperatura en grados Kelvin) pueden expresarse en la forma

$$\mu(T) = 10^{-3} [1 + 0,015512(T - 293,15)] \quad (8.15)$$

$$\mu(c) = 10^{-3} [1 + 1,85c - 4,1c^2 + 44,5c^3] \quad (8.16)$$

Para temperaturas de 10÷30 °C, la viscosidad varía del orden de $\pm 14\%$ en relación con su valor a 20 °C. Aún mayores son las desviaciones con la concentración; desde $c=0$ a su valor de saturación la viscosidad se dobla lo que, de acuerdo con la ley de Darcy, supone duplicar la velocidad. En campo, se mide la conductividad hidráulica (en lugar de la viscosidad), $K = k\rho_0 g/\mu$, parámetro en el que las influencias de ρ y μ aparecen agrupadas. Dado que la permeabilidad (k) puede variar un orden de magnitud o más para un mismo acuífero, las variaciones de densidad ejercen poca influencia en el patrón y pueden definitivamente despreciarse.

8.2.1.3. Expresiones generales

Las deducciones siguientes se apoyan en los estudios de Bear (1972) y en la documentación proporcionada por los códigos SUTRA (Voss, 1984), FEFLOW (Diersch, 1996) y FAST-C (Holzbecher, 1998). Asumimos flujo saturado con transporte de soluto no reactivo con influencia despreciable de los cambios de temperatura y viscosidad.

Los principios de conservación (teorema de transporte de Reynolds). Constituyen la base de las ecuaciones de transporte para el fluido y el soluto. Considérese una propiedad $\tau(x,y,z)$ que se propaga con la velocidad del fluido \mathbf{v}_τ . En una región R limitada por la superficie S , la conservación de τ supone que su cambio total en R es el cambio local dentro de la región más el flujo neto de salida a través de S :

$$\frac{d}{dt} \int_R \tau dR = \int_R \frac{\partial \tau}{\partial t} dR + \int_S \tau \mathbf{v}_\tau \cdot \mathbf{n} dS \quad (8.17)$$

donde \mathbf{n} es el vector unitario normal a S . La conservación de τ establece que

$$\int_R \frac{\partial \tau}{\partial t} dR + \int_S \tau \mathbf{v}_\tau \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (8.18)$$

expresión que, con el teorema de Gauss $\int_S \tau \mathbf{v}_\tau \cdot \mathbf{n} dS = \int_R \nabla \cdot (\tau \mathbf{v}_\tau) dR$, se reduce a

$$\int_R \frac{\partial \tau}{\partial t} dR + \int_R \nabla \cdot (\tau \mathbf{v}_\tau) dR = 0 \quad (8.19)$$

y, como se trata de una región arbitraria

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + \nabla \cdot (\tau \mathbf{v}_\tau) = 0 \quad (8.20)$$

Ahora bien, es necesario distinguir dos tipos de velocidad: la de la propiedad conservada, \mathbf{v}_τ , y la del fluido, \mathbf{v} . Si τ se refiere al fluido ambas velocidades son idénticas, pero si se refiere al soluto no lo son ya que éste puede extenderse más rápidamente o más lentamente que el fluido que lo transporta (debido a los efectos de difusión y dispersión). Reorganizando los términos de la ecuación anterior, tenemos

$$\frac{\partial}{\partial t} \tau + \nabla \cdot [\tau \mathbf{v}] + \nabla \cdot [\tau (\mathbf{v}_\tau - \mathbf{v})] = 0 \quad (8.21)$$

donde las dos velocidades son genéricas en tanto que aplicables a cualquier tipo de propiedad conservativa que viaja con el fluido. Esta ecuación es la base para la deducción de las ecuaciones de transporte de flujo y soluto. Para la ecuación de flujo $\mathbf{v} = \mathbf{v}_\tau$ y $\tau = \phi \rho$, donde ϕ es la matriz porosidad, con lo que la ecuación anterior queda en la forma

$$\frac{\partial (\phi \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \rho \mathbf{v}) = 0 \quad (8.22)$$

Para el transporte de soluto se conserva su masa, $\phi \rho c$; las velocidades \mathbf{v} y \mathbf{v}_τ pueden, obviamente, diferir. Con todo, la ecuación (8.21) queda reducida a

$$\frac{\partial (\phi \rho c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \rho c \mathbf{v}) + \nabla \cdot [\phi \rho c (\mathbf{v} - \mathbf{v}_{\text{sol}})] = 0 \quad (8.23)$$

En suma, las ecuaciones (8.22) y (8.23) son la base de todas las formas de ecuaciones de gobierno. Para completarlas es necesario añadir las ecuaciones que describen la porosidad, ϕ , la densidad, ρ , y las velocidades \mathbf{v} y \mathbf{v}_{sol} . Las ecuaciones deducidas a continuación son las empleadas en SUTRA (Voss, 1984) y PORFLOW (ACRI, 1994), así como por Ackerer et al. (1999) y por Oltean y Bués (2001). Otros autores como Oldenburg y Pruess (1995) y Frolkovic y Schepper (2000) utilizan ecuaciones constitutivas diferentes para la densidad.

La ecuación del flujo de fluido. La combinación del principio de conservación, ec. (8.22), con la ley de Darcy, ec. (8.10), asumiendo constantes los parámetros ρ , μ , ϕ y \mathbf{k} , conduce a la ecuación de gobierno para el agua subterránea:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho) = \nabla \cdot \left(\rho \frac{\mathbf{k}}{\mu} (\nabla p - \rho \mathbf{g}) \right) \quad (8.24)$$

en la que sólo la presión se mantiene como variable dependiente. Para resolver esta ecuación es necesario conocer la dependencia $\rho = \rho(c, T, p)$, ecuación de estado que se simplifica con las hipótesis asumidas a $\rho = \rho(c)$.

La ecuación de transporte. La sustitución de las expresiones

$$\frac{\partial(\varphi \rho c)}{\partial t} = c \frac{\partial(\varphi \rho)}{\partial t} + \varphi \rho \frac{\partial c}{\partial t} \quad (8.25)$$

$$\nabla \cdot (\varphi \rho c \mathbf{v}) = c \nabla \cdot (\varphi \rho \mathbf{v}) + \varphi \rho \mathbf{v} \cdot \nabla c \quad (8.26)$$

en (8.23) conduce a

$$c \left\{ \frac{\partial(\varphi \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi \rho \mathbf{v}) \right\} + \varphi \rho \frac{\partial c}{\partial t} + \varphi \rho \mathbf{v} \cdot \nabla c + \nabla \cdot [\varphi \rho c (\mathbf{v} - \mathbf{v}_{sol})] = 0 \quad (8.27)$$

El término entre llaves es idénticamente cero (conservación del fluido) con lo que

$$\varphi \rho \frac{\partial c}{\partial t} + \varphi \rho \mathbf{v} \cdot \nabla c + \nabla \cdot [\varphi \rho c (\mathbf{v} - \mathbf{v}_{sol})] = 0 \quad (8.28)$$

El término $(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{sol})$ representa la mezcla de soluto en el fluido por difusión y dispersión. La sustitución de este término, a través de la Ley de Fick (Bear, 1972) basada en la concentración adimensional

$$c(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{sol}) = -\mathbf{D} \cdot \nabla c \quad (8.29)$$

junto con la Ley de Darcy, permite expresar, finalmente la ecuación de transporte de soluto:

$$\varphi \rho \frac{\partial c}{\partial t} - \rho \left[\frac{\kappa}{\mu} (\nabla p - \rho \mathbf{g}) \right] \cdot \nabla c - \nabla \cdot [\varphi \rho \mathbf{D} \cdot \nabla c] = 0 \quad (8.30)$$

Alguna variante de esta ecuación, Kinzelbach (1987) y Holzbecher (1997), contiene un factor de retardo para recoger la influencia de la adsorción y la desorción, importantes en el transporte de metales pesados e isótopos radioactivos pero despreciables en el transporte de sal.

La aproximación de Boussinesq. La hipótesis de Oberbeck-Boussinesq, que asume que los cambios de densidad no afectan a la ecuación de continuidad del flujo sino sólo al término de flotación de la ley de Darcy, conduce a una simplificación sustancial de las ecuaciones de gobierno. Así, la ecuación de continuidad se reduce a

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (8.31)$$

La sustitución de la ley de Darcy en la ecuación anterior conduce a las ecuaciones siguientes (la segunda para medios homogéneos, isotrópicos y de viscosidad constante):

$$\nabla \cdot \frac{\mathbf{k}}{\mu} \nabla p = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_z}{\mu} \rho g \right) \quad (8.32)$$

$$\nabla^2 p = g \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (8.33)$$

En cuanto a la ecuación del soluto (8.30), la aproximación de Boussinesq junto con la hipótesis de porosidad constante y factor de retardo unidad, permiten expresarla como

$$\phi \frac{\partial c}{\partial t} = \phi \nabla (\mathbf{D} \nabla c) + \mathbf{q} \nabla c \quad (8.34)$$

Los argumentos que permiten simplificar las ecuaciones anteriores aplicando la aproximación de Boussinesq no son unánimes aunque existe acuerdo en que dichas ecuaciones constituyen un modelo aceptable. A este respecto nos referimos al trabajo formal de Oberbeck (1879) y a los posteriores de Chandrasekhar (1961), Mihaljan (1962), Fife (1970) y Joseph (1976).

8.2.1.4. Formulación con la altura piezométrica

La mayor parte de los programas de simulación, entre los que se incluye SEAWAT (2003) con el que implementaremos el modelo para simular el escenario de esta memoria, utilizan esta formulación. Midiendo z positivo hacia abajo (dirección de \mathbf{g}), la altura piezométrica se define como $h = (p/\rho g) - z$. La ley de Darcy en términos de h es

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla h \quad \mathbf{K} = \frac{\rho g}{\mu} \mathbf{k} \quad (8.35)$$

con lo que, sustituyendo h , tenemos

$$\mathbf{q} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu} (\nabla \rho g (h + z) - \rho g \mathbf{e}_z) = -\frac{\mathbf{k}}{\mu} (\rho g \nabla h + (h + z) \rho \nabla \rho) = -\mathbf{K} \nabla h - \frac{\mathbf{k}}{\mu} (h + z) g \nabla \rho \quad (8.36)$$

En términos de la altura piezométrica equivalente de agua dulce, h_f , definida como

$$h_f = \frac{p}{\rho_0 g} - z, \text{ con } \mathbf{K}_f = \frac{\rho_0 g}{\mu} \mathbf{k},$$

la velocidad es

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K}_f \left(\nabla h_f - \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \mathbf{g} \right) \quad (8.37)$$

La sustitución de estas expresiones de velocidad en la ecuación de continuidad conduce a la ecuación diferencial del flujo para las variables h o h_f (Sender y Fogg, 1990). En la formulación de las ecuaciones de gobierno con la variable h , se trabaja con el parámetro conductividad hidráulica del agua, muy familiar para los hidrogeólogos; sin embargo, la propia variable h es artificial ya que no se puede medir directamente en campo. Además, la formulación de las condiciones de contorno, habitualmente dadas en términos de la presión, deben ser convertidas a la variable h .

8.2.1.5. Formulación con la función de corriente

Para flujos 2-D que satisfacen la aproximación de Boussinesq, $\nabla \mathbf{v} = 0$, se define la función de corriente (Zheng y Bennett 1995), ψ (m^2/s), en la forma

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = q_z \quad \frac{\partial \Psi}{\partial z} = -q_x \quad (8.38)$$

Esta expresión es la formulación 2-D de la ecuación vectorial $\mathbf{v} = \nabla \times \boldsymbol{\psi}$ (un cambio de signos en las definiciones anteriores conduce a una función de corriente diferente). Para un dominio de anchura unidad las diferencias de ψ , entre dos líneas de corriente, indican el flujo volumétrico entre dichas líneas por unidad de superficie normal a ellas (m/s). Esta definición es a menudo usada para deducir a primera vista el caudal en las representaciones gráficas donde los incrementos entre líneas ($\Delta\psi$) son constantes; las velocidades de flujo, tangentes a las líneas de corriente, son elevadas en las zonas de mayor estrechamiento entre líneas, mientras que son bajas en las regiones donde las líneas se ensanchan. A pesar de que ψ es una variable de medida indirecta, la formulación 2-D mediante esta variable tiene la ventaja de que una única variable escalar (la componente de $\boldsymbol{\psi}$ perpendicular al dominio) describe completamente el flujo, Peyret y Taylor (1985) y Frind y Matanga (1985). Además es posible la representación de flujos transitorios con ciertas precauciones en su interpretación, ya que las líneas de corriente y las líneas de flujo no son coincidentes en este caso. Advuértase que los valores absolutos de ψ son arbitrarios; la obtención de velocidades como derivadas de ψ permite establecer una referencia para esta variable ya que lo que importa son sus diferencias entre los puntos del dominio. La referencia arbitraria suele imponerse en las fronteras del dominio utilizando las ecuaciones (8.38) en forma discretizada: $\Delta\psi_x = q_z\Delta x$ y $\Delta\psi_z = q_x\Delta z$, donde $\Delta\psi$ es el flujo por unidad de anchura o profundidad.

Las ecuaciones (8.39) junto con la ley de Darcy para el caso más general (medio anisótropo) conducen a la ecuación de flujo

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{k_z} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{k_x} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{k_z} q_z \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{k_x} q_x \right) = -g \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (8.39)$$

La hipótesis de viscosidad constante en una región local, lo que Holzbecher (1998) llama ‘extended Oberbeck-Boussinesq approximation’), aunque su valor pueda variar apreciablemente en todo el dominio, permite reescribir la ecuación anterior de forma que μ quede agrupada en el término de flotación:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{I}{k_z} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{I}{k_x} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) = -\frac{g}{\mu} \frac{\partial \rho}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8.40)$$

Así, la ecuación anterior del flujo, con la definición de la función de corriente (8.38) y la (8.35) para el soluto, constituyen el conjunto más general de ecuaciones diferenciales (no adimensionales) que rigen el flujo de agua con transporte de soluto no reactivo, sin retardo, ya que permite asumir valores no constantes para los parámetros ρ , μ y D . Estas tres ecuaciones ((8.34), (8.38) y (8.40)), en forma discretizada en el espacio, son las que se utilizan para construir los modelos en red del programa FATSIM-A.

Aparte de la ventaja de definir completamente el patrón de flujo a partir de una única variable escalar, el uso de la función de corriente tiene otras ventajas en relación con la elección de las variables independientes clásicas presión (o altura piezométrica) y concentración (Evans y Raffensperger, 1992), en particular, cuando esta variable se usa en simulaciones numéricas con gradientes hidráulicos muy pequeños como ocurre en el flujo asociado a densidad variable, Frind y Matanga (1985). En todo caso la formulación mediante la función de corriente proporciona soluciones que garantizan la conservación de la masa del fluido incluso cuando se obtienen soluciones erróneas o no convergentes. De acuerdo con Patankar (1980), las discretizaciones de segundo orden (diferencias centrales) de las ecuaciones de la presión o altura piezométrica conducen implícitamente a la continuidad del flujo en celdas no adyacentes, lo que produce un campo ondulante de presiones que resulta problemático a la hora de calcular las velocidades del flujo. Esta interesante ventaja se acentúa en problemas acoplados de flujo de fluido con transporte de soluto ya que una garantía de la conservación de la masa de fluido hace probable que las soluciones intermedias, obtenidas por iteración, sean físicamente razonables y promuevan la convergencia del problema. Si no fuera así (no se conserva la masa) los errores serían acumulables y las soluciones podrían no ser convergentes. Es interesante apuntar que la conservación de masa es doblemente controlada con el uso del método de simulación por redes, ya que la propia ley de corrientes de Kirchhoff (inherente en los códigos de simulación de circuitos eléctricos) expresa la conservación de la corriente eléctrica que representa los flujos de agua y soluto en circuitos separados.

A diferencia de las formulaciones de presión y altura piezométrica, incluso cuando estas variables se obtienen con precisión, las velocidades pueden calcularse fácilmente a partir de la función de corriente y son consistentes nodo a nodo, Yeh, (1981) y Voss, (1984). Por otro lado, las estimaciones de la descarga específica introducen errores añadidos en las formulaciones de presión y altura piezométrica debido al cálculo de la densidad media de la cual depende, errores que son en general mayores que los debidos a los cálculos de presión en los nodos. Esta nueva causa de error se elimina también con el uso de la función de corriente. Todo lo anterior incide en que las soluciones del campo de velocidades con esta formulación tiendan a converger más rápidamente y con mayor estabilidad numérica que en las formulaciones de presión y altura piezométrica.

No obstante, el uso de la función de corriente asume implícitamente flujo estacionario con cambios despreciables en el almacenamiento. Mientras que ésta no es una hipótesis severa en problemas de convección libre, sí lo es cuando se trata de flujos en las cercanías de pozos de bombeo o cuando los dominios del agua subterránea están sometidos a presiones elevadas. La función de corriente no es una variable que se pueda medir directamente sino que se calcula a partir de otras como la descarga específica, la presión o la altura piezométrica. Otras desventajas del uso de la función de corriente están relacionadas con las dificultades para especificar ciertas condiciones como fuentes o sumideros en el fluido o el propio nivel piezométrico, Frind y Matanga (1985). También, la implementación de flujos en tres dimensiones es otro inconveniente, si bien Bear (1972) propone alguna alternativa a esta solución que estudiaremos en un futuro para ampliar FATSIM-A a escenarios 3-D.

8.2.2. FORMULACIÓN ADIMENSIONAL CLÁSICA

El objetivo de esta formulación es presentar las ecuaciones de gobierno en su forma más simplificada, agrupando el conjunto de características físicas geométricas en el menor grupo de coeficientes independientes llamados números adimensionales. Nuestro objetivo es investigar por primera vez la aplicación de esta formulación, en su versión discriminada, a los escenarios de intrusión en las cercanías de explotaciones salineras, asumiendo coeficientes de difusión efectivos que integran la difusividad molecular y la dispersión y considerando anisotropía en este coeficiente para acercarnos más a las situaciones reales.

Cuando el coeficiente de dispersión es un escalar es posible formular las ecuaciones de flujo de densidad variable con transporte de soluto en forma adimensional. En problemas de intrusión u otros de similar índole existen dos formulaciones adimensionales clásicas (aunque pueden establecerse otras); la de Henry, adoptada posteriormente por Lee y Cheng (1974), Croucher y O'Sullivan (1995) y Gotoback et al. (2003), y la de Holzbecher (1998). En la primera se adoptan las variables adimensionales siguientes:

$$x' = \frac{x}{l}, \quad y' = \frac{y}{d}, \quad c' = \frac{c}{c_s}, \quad q' = q \frac{d}{Q}, \quad \rho' = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_s - \rho_0} = c' \quad y \quad t' = \frac{D}{d^2} t \quad (8.41)$$

donde l y d son la longitud y profundidad del acuífero, respectivamente. Estas variables, en función de ψ , conducen a las ecuaciones de gobierno

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial y'^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial c'}{\partial x'} \quad (8.42a)$$

$$\frac{\partial^2 c'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 c'}{\partial y'^2} - \frac{1}{b} \left(\frac{\partial \psi'}{\partial y'} \frac{\partial c'}{\partial x'} - \frac{\partial \psi'}{\partial x'} \frac{\partial c'}{\partial y'} \right) = \frac{\partial c'}{\partial t'} \quad (8.42b)$$

Los coeficientes $a = \frac{\mu Q}{k g d (\rho_s - \rho_0)}$ y $b = \frac{\phi D}{Q}$ son los llamados parámetro de descarga

e inverso del número de Peclet de infiltración, respectivamente; $b=1/P_e$; a estos grupos independientes hay que añadir la relación de aspecto H/L . En la segunda, se eligen las variables adimensionales

$$x' = \frac{x}{H}, \quad y' = \frac{y}{H}, \quad t' = \frac{D}{H^2} t, \quad v' = \frac{H}{D} v, \quad c' = \frac{c - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \quad y \quad \psi' = \frac{\psi}{D}$$

donde c_{\min} y c_{\max} representan las concentraciones de agua dulce y agua salada, y H es la profundidad del acuífero. Asumiendo la dependencia lineal $\rho = \rho_0 + c \Delta \rho$, las ecuaciones de gobierno adimensionales quedan en la forma:

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial y'^2} = Ra \frac{\partial c'}{\partial x'} \quad (8.43a)$$

$$\frac{\partial^2 c'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 c'}{\partial y'^2} - \left(\frac{\partial \psi'}{\partial y'} \frac{\partial c'}{\partial x'} - \frac{\partial \psi'}{\partial x'} \frac{\partial c'}{\partial y'} \right) = \frac{\partial c'}{\partial t'} \quad (8.43b)$$

donde el coeficiente adimensional Ra es el llamado número de Rayleigh, $Ra = k(\Delta \rho)gH/\mu D$, una especie de balance entre fuerzas de flotación y de difusión. Ra está relacionado con los parámetros a y b de Henry mediante la expresión $Ra = (ab)^{-1}$, mientras que las difusividades de Henry y de Holzbecher están conectadas a través de la porosidad, $D_{Hol} = \phi D_{Hen}$.

8.2.3. FORMULACIÓN ADIMENSIONAL DISCRIMINADA

Las anteriores formulaciones adimensionales, deducidas bajo una técnica clásica de adimensionalización de las EDP, sólo son aplicables a escenarios isótropos en relación con la conductividad hidráulica y la difusividad; su extensión a escenarios anisótropos (no estudiada por los autores), con las definiciones de variables adimensionales adoptadas tanto por Henry como por Holzbecher, añade dos nuevos números, los cocientes k_x/k_y y D_x/D_y . Con todo, estas adimensionalizaciones clásicas, por un lado, conducen a un mayor número de monomios (como vamos a ver a continuación) que la adimensionalización discriminada y, por otro, proporcionan grupos adimensionales cuyo significado estricto no es el balance entre los posibles pares de efectos o fuerzas del problema.

La adimensionalización discriminada para el problema de intrusión anisótropo de Henry (Alhama et al., 2010d y 2010i) parte de las variables adimensionales, justificadas por la técnica de discriminación (Alhama y Madrid, 2010),

$$x' = x/L, \quad y' = y/H, \quad v_x' = q_x'/\epsilon = v_x/v_{amb}^* \quad \text{and} \quad v_y' = q_y'/\epsilon = v_y/v_y^*$$

Las dos velocidades de referencia emergen de la ecuación (8.37), la velocidad de flujo regional causada por el gradiente de presiones entre los bordes laterales del dominio, $v_{amb}^* = q_{amb}^*/\varepsilon = (k_x/\mu)\nabla p_x$, y la velocidad vertical inducida por el efecto de densidad variable $v_y^* = q_y^*/\varepsilon = (k_y g \Delta \rho)/(\varepsilon \mu)$. Por otro lado, la ecuación de continuidad del flujo, $\nabla \mathbf{q} = 0$, que aplica a la región de mezcla cuya extensión en x es desconocida pero del orden de magnitud de L , puede escribirse en la forma $\partial q_x/\partial x = \partial q_y/\partial y$ o $\partial v_x/\partial x = \partial v_y/\partial y$. Usando los valores de referencia elegidos anteriormente para adimensionalizar las coordenadas espaciales y las velocidades, la forma adimensional de esta ecuación, $(v_x^*/L)(\partial v_x'/\partial x') = (v_y^*/H)(\partial v_y'/\partial y')$, proporciona una nueva velocidad horizontal en esta región, v_x^* , que se deduce del grupo adimensional $(v_x^*/L)/(v_y^*/H) = v_x^* H/(v_y^* L)$. Esta velocidad es (advértase que el factor H/L , permite que el cociente v_x^*/v_y^* tenga dimensión nula con discriminación)

$$v_x^* = v_y^* L/H = (k_y g \Delta \rho) L / (\varepsilon \mu H)$$

La existencia de dos referencias para la velocidad horizontal, v_{amb}^* y v_x^* o $(k_y g \Delta \rho) L / (\varepsilon \mu H)$, proporciona un primer grupo adimensional discriminado para el problema de intrusión:

$$\pi_{d,1} = v_x^* / v_{amb}^* = (k_y g \Delta \rho L) / (\varepsilon \mu v_{amb}^* H) = [(k_y g \Delta \rho) / (\varepsilon \mu v_{amb}^*)] (L/H)$$

Fuera de la región de mezcla, la ecuación de continuidad $\nabla \mathbf{q} = 0$ proporciona otro grupo adimensional discriminado que relaciona las permeabilidades vertical y horizontal. En esta región los flujos son inducidos por los gradientes de presión, $q_x = (k_x/\mu_x)(\partial p/\partial x)$ y $q_y = (k_y/\mu_y)(\partial p/\partial y)$ con $\mu_x = \mu_y = \mu$. Tomando una referencia arbitraria para la presión, Δp_o , la forma adimensional de la ecuación

$$(k_x \Delta p_o / (\mu L^2)) (\partial q_x' / \partial x') = (k_y \Delta p_o / (\mu H^2)) (\partial q_y' / \partial y')$$

proporciona un nuevo grupo adimensional discriminado, una especie de cociente de permeabilidades corregido, independiente del tipo de fuerza que causa el movimiento del fluido,

$$\pi_{d,2} = (k_x H^2) / (k_y L^2)$$

En cuanto a la adimensionalización de la ecuación de transporte, suprimiendo el factor común de referencia para la concentración, $\Delta c_o = c_s - c_f$, y tomando como velocidad de referencia v_{amb}^* , ésta puede escribirse en la forma

$$(v_{amb}^*/L)(v_x' \partial c' / \partial x') + (v_y^*/H)(v_y' \partial c' / \partial y') + (D_x/L^2)(\partial^2 c' / \partial x'^2) + (D_y/H^2)(\partial^2 c' / \partial y'^2) = 0$$

Cuatro coeficientes adimensionales (con dimensiones la inversa del tiempo) emergen de esta ecuación, a saber: v_{amb}^*/L , $v_y^*/H = (\Delta \rho) g k_y / (\varepsilon \mu H)$, D_x/L^2 y D_y/H^2 , de los que pueden

extraerse tres monomios adimensionales dividiéndolos todos por cualquiera de ellos. Así, dividiendo por el primero, por ejemplo, obtenemos los nuevos grupos

$$\pi_{d,1} = [(\Delta\rho)gk_y/(\epsilon\mu v_{amb}^*)](L/H), \quad \pi_{d,3} = D_x/(v_{amb}^*L), \quad \pi_{d,4} = D_yL/(v_{amb}^*H^2)$$

el primero de los cuales ya estaba definido. Combinando los grupos $\pi_{d,3}$ y $\pi_{d,4}$ para eliminar la velocidad del último, el problema de intrusión puede caracterizarse por cuatro números adimensionales discriminados. Son estos:

$$\pi_{d,1} = [(\Delta\rho)gk_y/(\epsilon\mu v_{amb}^*)](L/H) \quad (8.44a)$$

$$\pi_{d,2} = (k_xH^2)/(k_yL^2) \quad (8.44b)$$

$$\pi_{d,3} = D_x/(v_{amb}^*L) \quad (8.44c)$$

$$\pi_{d,4} = D_xH^2/(D_yL^2) \quad (8.44d)$$

El formalismo de la discriminación induce propiedades específicas a los grupos obtenidos. En primer lugar, no hay más grupos que los surgidos en el propio proceso de manipulación de las ecuaciones; así, no es posible la existencia de grupos del tipo H/L típicos del proceso clásico. En segundo lugar, los grupos emergentes son del orden de magnitud unidad en tanto que representan balances de la ecuación diferencial que definen diferentes efectos pero siempre asociados a la región en la que se producen (téngase en cuenta que los términos derivativos de las variables adimensionales están confinados en el rango (0-1). Finalmente, y como consecuencia añadida de la reflexión anterior, los grupos discriminados tienen un significado físico real: representan el balance entre dos magnitudes o efectos significativos del problema (aunque estas magnitudes pueden ser diferentes en función de cómo se expresen los grupos). Por ejemplo, el grupo $[(\Delta\rho)gk_y/(\epsilon\mu v_{amb}^*)](L/H) = (v_y^*/v_{amb}^*)(L/H)$, escrito en la forma $(v_y^*/H)/(v_{amb}^*/L)$, representa el cociente de dos tiempos: el requerido por el fluido para recorrer la anchura del acuífero (L) animado por la velocidad del flujo regional (v_{amb}^*), y el requerido para cubrir la profundidad del acuífero (H) con la velocidad de referencia vertical (v_y^*). Interpretaciones similares, resumidas en la tabla 8.2, pueden asociarse al resto de los grupos discriminados.

Grupos discriminados	Definición	Significado físico
$[(\Delta\rho)gk_y/(\epsilon\mu v_{amb}^*)](L/H)$	Cociente de velocidades corregido	Tiempo requerido por el fluido para recorrer L con velocidad v_{amb}^* /ídem para cubrir H con velocidad v_y^*
$(k_xH^2)/(k_yL^2)$	Cociente de permeabilidades corregido	Tiempo requerido por el fluido para recorrer L /ídem para cubrir H (con la misma velocidad)
$D_x/(v_{amb}^*L) = (D_x/L^2)/(v_{amb}^*/L)$	Cociente difusión efectiva/arrastre (horizontal)	Tiempo requerido por el fluido para recorrer L con velocidad v_{amb}^* /ídem por efecto de la difusión
$D_xH^2/(D_yL^2)$	Cociente de difusividades corregido	Tiempo requerido para recorrer H /ídem para cubrir L (ambos por efecto de la difusión)

Tabla 8.2. Significado físico de los grupos adimensionales discriminados

8.2.4. GRUPOS ADIMENSIONALES ASOCIADOS CON LA EXPLOTACIÓN SALINERA

La geometría y condiciones de contorno de este escenario se muestran en la figura 8.1. Para el mismo, la existencia de tres longitudes características en la dirección a lo largo del acuífero obliga a incluir dos nuevos grupos adimensionales discriminados, el cociente entre la extensión de la salina (l_s) y la longitud del acuífero (L) y el cociente entre la longitud anterior al borde salino (l_o) y (por ejemplo) la longitud del acuífero (L):

$$\pi_{d,5} = l_s/L \quad (8.44e)$$

$$\pi_{d,6} = l_o/L \quad (8.44f)$$

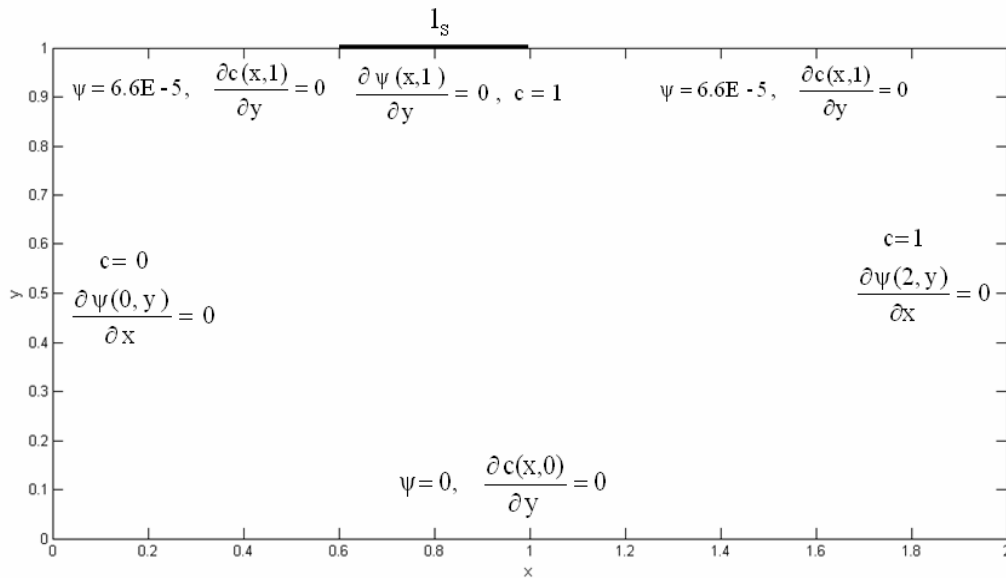


Figura 8.1. Escenario 2-D de intrusión marina en las cercanías de explotaciones salineras.
Modelo físico y condiciones de contorno

También, si la concentración de contorno de concentración constante impuesta en la frontera donde está ubicada la explotación es diferente de la concentración de sal del agua del mar, debe considerarse un nuevo grupo adimensional formado a partir de las concentraciones del agua dulce ($c_{\text{agua dulce}}$), del agua del mar ($c_{\text{agua del mar}}$) y de la frontera de la explotación (c_{salinas}):

$$\pi_{d,7} = (c_{\text{salinas}} - c_{\text{agua dulce}})/(c_{\text{salinas}} - c_{\text{agua del mar}}) \quad (8.44g)$$

8.2.5. JUSTIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

La tabla 8.3 lista los valores de los parámetros usados, los cuales han sido traídos del problema de Henry (1964a y b). El mallado seleccionado es 50(celdas horizontales)×25(celdas verticales) y su simulación se lleva a cabo en FATSIM-A (apartado siguiente).

Símbolo	Valor	Unidad
D	6.6×10^{-6}	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
g	9.81	m s^{-2}
k	1.020408×10^{-9}	m^2
Q	6.6×10^{-5}	m s^{-1}
ε	0.35	-
μ	1.0×10^{-3}	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ρ_f	1000	kg m^{-3}
ρ_s	1025	kg m^{-3}
L	2	m
H	1	m

Tabla 8.3. Parámetros hidrogeológicos y geométricos del problema

Los valores de difusión molecular y permeabilidad se muestran en la tabla 8.4. En relación con los datos de la explotación salinera se han adoptado (sin pérdida de generalidad) los valores $l_s=0.4$, $L-l_s=1.6$, $l_0=0$ y $c_s=1$. Con esta hipótesis, siguiendo la caracterización clásica, los patrones deberían ser diferentes para ambos escenarios dado que los cocientes de los grupos adimensionales clásicos son claramente diferentes: $D_x/D_y=5$ y $k_x/k_y=1$, para el escenario 1, y $D_x/D_y=1$ y $k_x/k_y=0.5$, para el escenario 2. Siguiendo la caracterización discriminada los patrones deberían ser idénticos ya que los grupos adimensionales $\pi_{d,1}$ a $\pi_{d,7}$ son los mismos para ambos escenarios. Efectivamente, la simulación proporciona los patrones idénticos, figura 8.2, confirmando los resultados de la discriminación. La cuña de intrusión clásica ha cambiado apreciablemente por la presencia de la región contaminada bajo la explotación salinera.

	D_x	D_y	k_x	k_y
Escenario 1	$10D_{x\text{Henry}}$	$2D_{y\text{Henry}}$	$k_{x\text{Henry}}$	$k_{y\text{Henry}}$
Escenario 2	$D_{x\text{Henry}}$	$D_{y\text{Henry}}$	$2k_{x\text{Henry}}$	$4k_{y\text{Henry}}$

Tabla 8.4 Valores de los parámetros para dos escenarios de intrusión sin explotación salinera

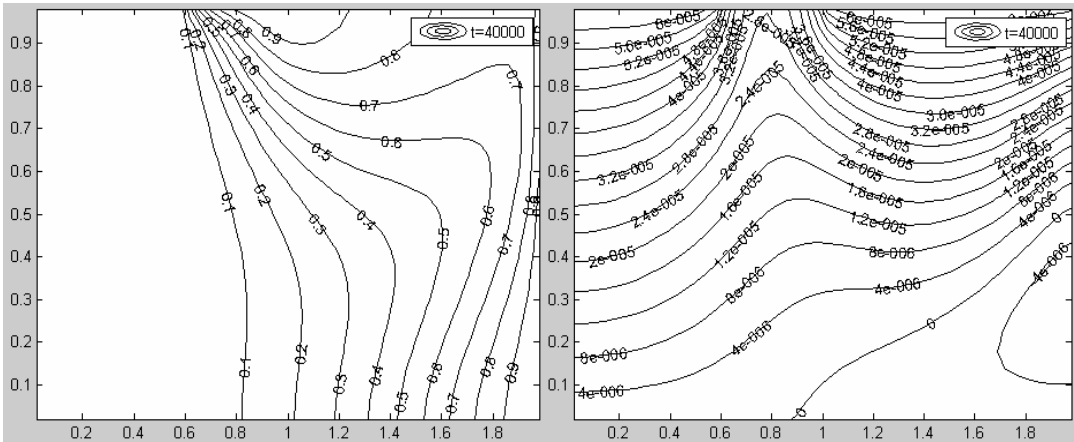


Figura 8.2. Patrones de isoconcentración y función de corriente comunes a los escenarios con explotaciones salineras, 1 y 2, de la tabla 8.4

8.2.6. EL PROGRAMA FATSIM-A (© UPCT)

La elaboración de este programa, realizada durante los años 2009 y 2010, era una tarea necesaria para los investigadores en el campo de flujo y transporte en medios porosos dentro del grupo de investigación ‘Simulación por redes’ de la UPCT. Los programas comerciales son caros y requieren, en todo caso, un conocimiento específico de los algoritmos matemáticos de programación, al alcance directo sólo de los que han participado en su diseño. Buscábamos integrar en un programa moderno el diseño y simulación de modelos ya diseñados por el grupo, incorporando las características propias de los programas comerciales (entorno de ventanas para comunicación con el usuario, posibilidad de acceso a los archivos de modelo para su manipulación y programación, potente entorno gráfico de representación de resultados, etc.), sin merma de su fiabilidad y rapidez computacional. El resultado es un programa que no requiere conocimientos especiales para su uso pues los diseños de modelo que construye son intuitivos y comprensibles para un investigador o estudiante con formación de grado y conocimientos fundamentales de las ecuaciones de gobierno de estos procesos. La potencia del mismo, aunque limitada a 2-D, trasciende las aplicaciones sencillas constituyendo una herramienta muy útil en el campo de investigación como hemos visto en el apartado anterior.

El Método de simulación por redes, técnica en la que se basa la solución numérica de FATSIM-A, se articula en dos etapas: i) obtención de un circuito eléctrico (modelo en red) equivalente al modelo matemático, incluyendo las condiciones iniciales y de contorno y, ii) resolución numérica del mismo mediante un software adecuado (simulación). Para esta etapa adoptaremos el programa Pspice 6.0 (1994).

8.2.6.1. Estructura del programa

Este programa creado en primer término para la simulación y caracterización de escenarios 2-D y cuyo anagrama se muestra en la figura 8.3 es, en principio, uno más entre los muchos códigos comerciales educativos y de investigación aplicados a ciencias e ingeniería y uno más entre los pocos dedicados al flujo de fluido en medios porosos con transporte de soluto; para una descripción detallada con aplicaciones docentes y de investigación, ver Alhama et al. (2010h). Sin embargo, su diseño tiene ciertas peculiaridades que creemos le diferencia y distingue de otros programas básicamente orientados al cálculo, con un código de computación numérico propio, y que funcionan a modo de caja negra de contenido, en general, inaccesible a usuario.



Figura 8.3. Anagrama de FATSIM-A

Tras la entrada de datos, dirigida paso a paso, y la creación del archivo del modelo, realizada de forma amena a través de un entorno de ventanas desarrollado con Microsoft C#, FATSIM-A procede a la simulación del modelo y a la presentación de resultados en el propio entorno del programa o, en mayor detalle, en el entorno gráfico de MATLAB (1997), merced a rutinas auxiliares incorporadas al programa. La simulación en Pspice, dentro de FATSIM-A, da acceso al entorno de salida gráfico de PSpice el cual permite representar simultáneamente las variables de salida en términos de las nuevas variables del modelo en red: corrientes y potenciales eléctricos. Asimismo, FATSIM-A permite presentar soluciones animadas de las isolíneas de concentración y flujo en problemas transitorios. La figura 8.4 muestra un esquema del funcionamiento básico del programa.

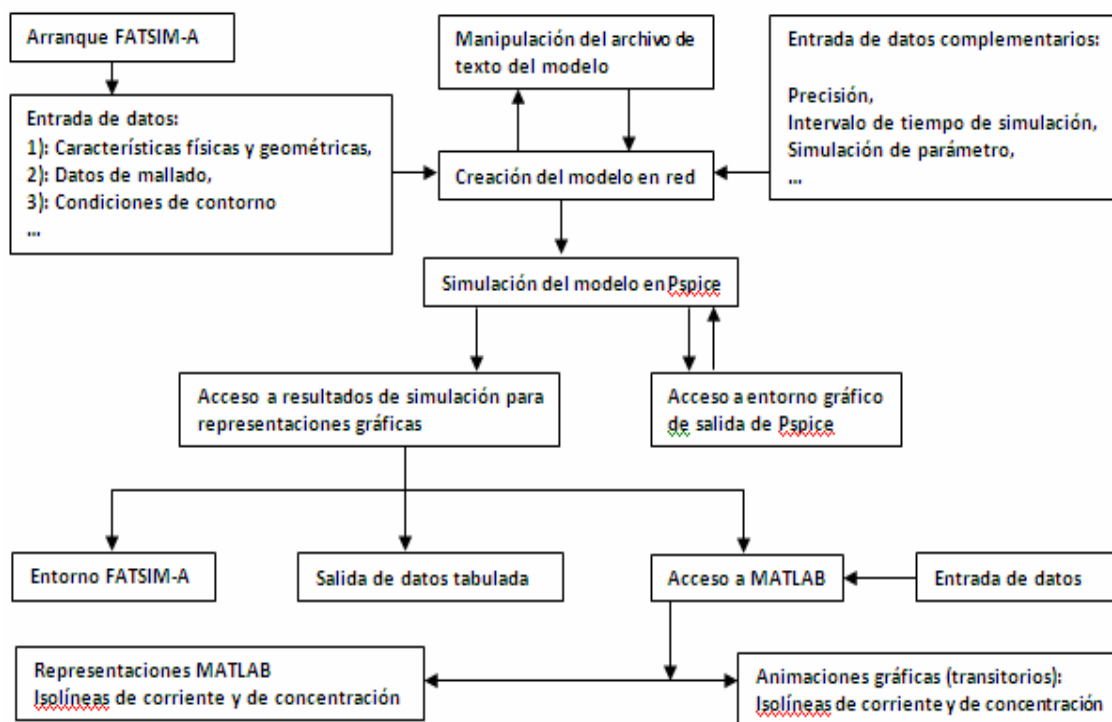


Figura 8.4. Diagrama de funcionamiento de FATSIM-A

La introducción de datos complementarios relativos al tipo de simulación (precisión en los cálculos, número de dígitos, tiempo de simulación, opciones de simulación avanzada y presentación, y otros), se produce paralelamente o al final de la creación del archivo del modelo. La asignación de nombres a los elementos del modelo así como la asignación de nodos sigue una regla sencilla, intuitiva y lógica, permitiendo al usuario localizar inmediatamente el elemento, sección o punto del modelo del que se desea obtener información. FATSIM-A incorpora un gráfico directo en el que se muestra la disposición de las celdas y la leyenda de sus nudos centrales (que sirve también para identificar los componentes de la celda: resistencias, condensadores y fuentes controladas), sus propiedades y las condiciones de contorno. Como opción añadida pueden modificarse y actualizarse datos

o información sobre la propia retícula, tanto para una celda como para un conjunto seleccionado de ellas.

8.2.6.2. Creación de archivos de modelos

Se presenta una síntesis de las pantallas de creación del modelo. La carpeta FATSIM-A da acceso al ejecutable ‘FATSIM-EXE’ que, a su vez, presenta la primera pantalla del programa, figura 8.5: ‘Diseñador FATSIM-A’.



Figura 8.5. Pantalla inicial del programa

La pantalla inicial permite cargar un modelo ya existente a través de la ruta adecuada, opción ‘Malla → Cargar’, o iniciar la creación de un nuevo modelo, opción ‘Malla → Nueva’, que da acceso a la pantalla de introducción de datos (figura 8.6): número y tamaño de celdas horizontales y verticales de la retícula, y propiedades del fluido y del medio en unidades del sistema internacional. La opción ‘aceptar’ da acceso a la retícula del modelo, figura 8.7, donde aparece la numeración de cada celda y el nombre de la capa. Las celdas se enumeran con 4 dígitos: los dos primeros corresponden a la posición horizontal (empezando por la celda 01 a la izquierda) y los dos últimos a la posición vertical (empezando a contar de abajo a arriba).

Al hacer clic con el botón izquierdo del ratón, con el cursor ubicado en una celda cualquiera, aparece la información de la misma en un cuadro ampliado: número de celda y condición de contorno, figura 8.8a-b. Pulsando el botón derecho se muestra un cuadro de diálogo que da acceso a la edición o reedición de las propiedades de la celda o de sus condiciones de contorno, figura 8.9a-b.

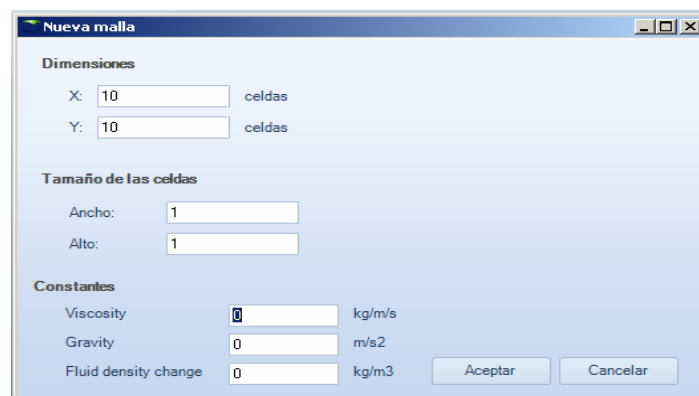


Figura 8.6. Pantalla de creación de nuevo modelo

0110 Layer	0210 Layer	0310 Layer	0410 Layer	0510 Layer	0610 Layer	0710 Layer	0810 Layer	0910 Layer	1010 Layer
0109 Layer	0209 Layer	0309 Layer	0409 Layer	0509 Layer	0609 Layer	0709 Layer	0809 Layer	0909 Layer	1009 Layer
0108 Layer	0208 Layer	0308 Layer	0408 Layer	0508 Layer	0608 Layer	0708 Layer	0808 Layer	0908 Layer	1008 Layer
0107 Layer	0207 Layer	0307 Layer	0407 Layer	0507 Layer	0607 Layer	0707 Layer	0807 Layer	0907 Layer	1007 Layer
0106 Layer	0206 Layer	0306 Layer	0406 Layer	0506 Layer	0606 Layer	0706 Layer	0806 Layer	0906 Layer	1006 Layer
0105 Layer	0205 Layer	0305 Layer	0405 Layer	0505 Layer	0605 Layer	0705 Layer	0805 Layer	0905 Layer	1005 Layer
0104 Layer	0204 Layer	0304 Layer	0404 Layer	0504 Layer	0604 Layer	0704 Layer	0804 Layer	0904 Layer	1004 Layer
0103 Layer	0203 Layer	0303 Layer	0403 Layer	0503 Layer	0603 Layer	0703 Layer	0803 Layer	0903 Layer	1003 Layer
0102 Layer	0202 Layer	0302 Layer	0402 Layer	0502 Layer	0602 Layer	0702 Layer	0802 Layer	0902 Layer	1002 Layer
0101 Layer	0201 Layer	0301 Layer	0401 Layer	0501 Layer	0601 Layer	0701 Layer	0801 Layer	0901 Layer	1001 Layer

Figura 8.7. Reticula del modelo para un mallado de 10×10

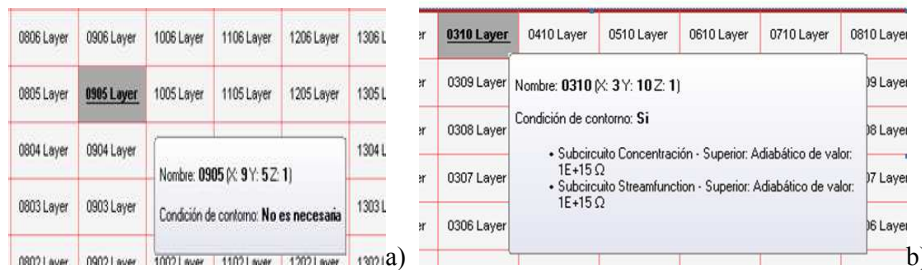


Figura 8.8. Detalle de información de una celda interior (a) y exterior (b)

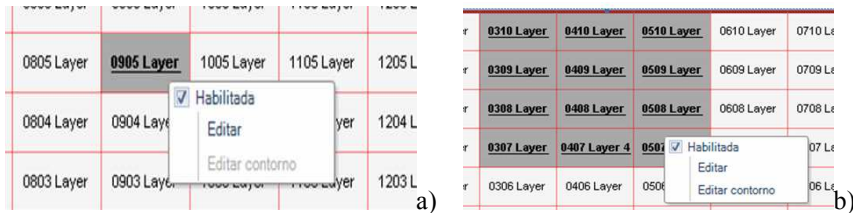


Figura 8.9. Pantallas de selección de celdas para editar (a) o implementar las condiciones de contorno (b)

Al pulsar el botón de las condiciones de contorno se muestran sucesivamente (entre otras) las pantallas de la figura 8.10a, para seleccionar el tipo de condición, y 8.10b, para señalar la posición.

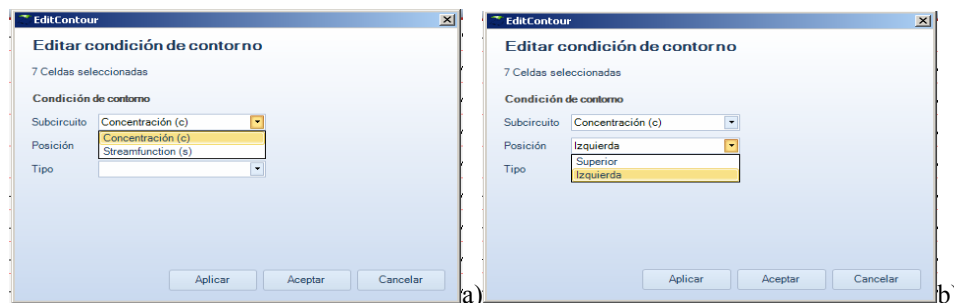


Figura 8.10. a): Pantalla de edición del tipo de condición de contorno, b): Selección de bordes

El programa no se ejecuta si las fronteras interiores del contorno o de las zonas huecas no tienen implementadas las necesarias condiciones. Este requisito es, asimismo, exigible a

todos los nodos del modelo para evitar fallos en el diseño por parte del usuario. La implementación de errores da lugar a la generación de avisos o advertencias al usuario, como se muestra en la figura 8.11 para el caso de un error en la introducción de los datos de la condición de contorno.

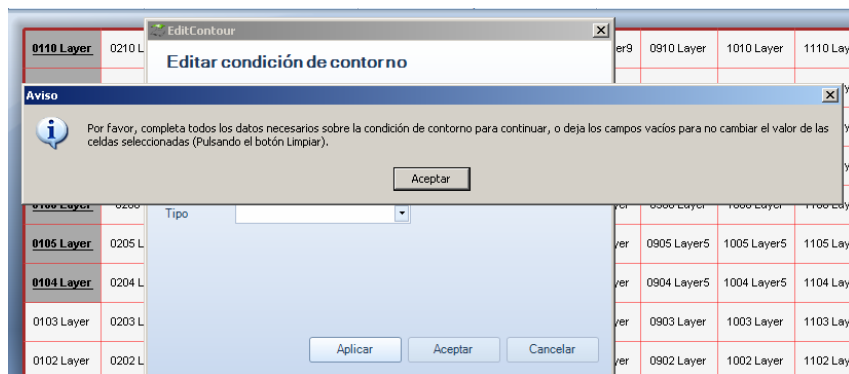


Figura 8.11. Condiciones de contorno. Advertencia de error en entrada de datos

El botón 'Editar' da acceso a la pantalla de edición, figura 8.12, que permite definir o redefinir las propiedades siguientes: nombre de la capa, ancho y alto, difusividad, permeabilidad y porosidad.

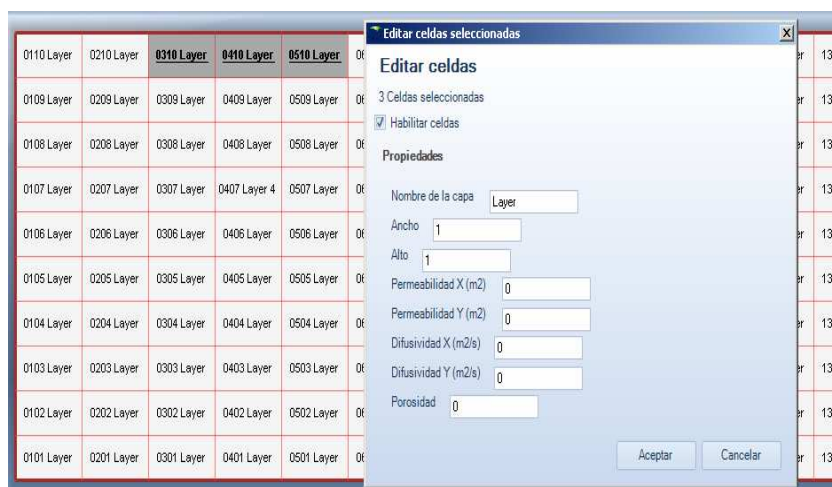


Figura 8.12. Cuadro de edición de un conjunto de celdas seleccionadas

El botón 'circuitos' del cuadro de dialogo principal da acceso a la pantalla mostrada en la figura 8.13 que muestra el código correspondiente al circuito de la capa seleccionada. Esta opción permite modificar sobre la pantalla los parámetros y componentes del circuito o incluso modificar por completo el subcircuito del conjunto de celdas que componen cada una de las capas ya definidas.

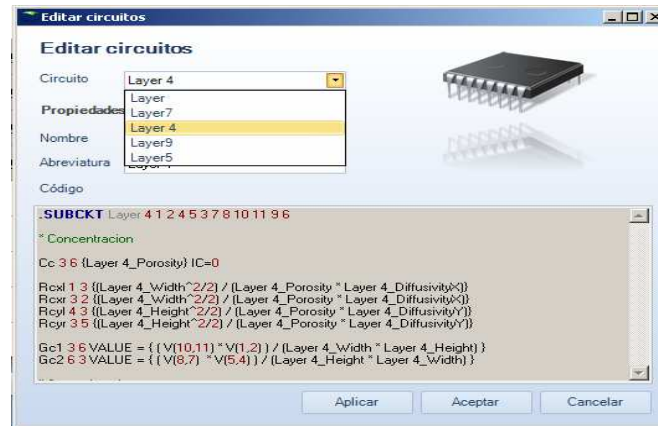


Figura 8.13. Pantalla de edición de circuitos

Por último, el botón ‘Opciones de simulación’ presenta la pantalla de la figura 8.14 que permite introducir datos complementarios relativos al intervalo de tiempos de la simulación (TRAN), tolerancia relativa de cálculo (‘RELTOL’), número de dígitos de los datos del archivo de salida y simulación del rango de valores de un parámetro. Esta opción permite presentar en el entorno gráfico de salida de Pspice, simultáneamente, las soluciones de una variable para el conjunto de valores especificados del parámetro.

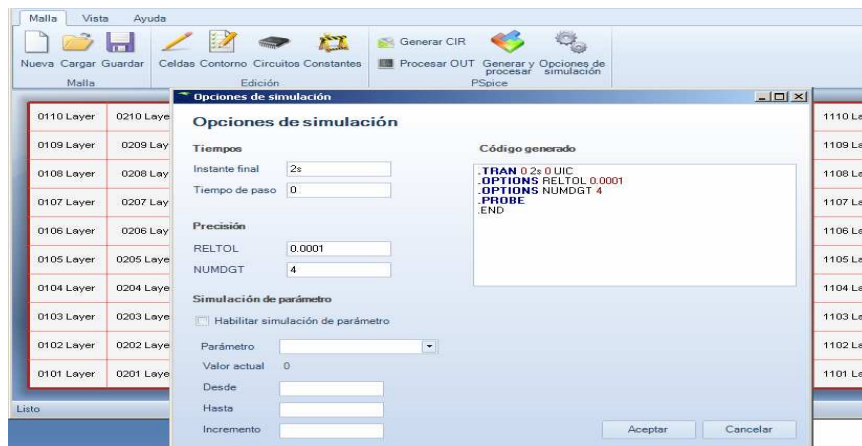


Figura 8.14. Cuadro de diálogo de introducción de tiempos de simulación y simulación de parámetro

Finalizado el diseño, la opción ‘Generar CIR’, o ‘Generar y procesar’, del menú principal presenta el archivo de texto del modelo sobre el que se pueden hacer comprobaciones y/o manipulaciones, tras las cuales puede guardarse, opción ‘Guardar CIR’ o ejecutarse, opción ‘Simular’. En este último caso FATSIM-A abre Pspice y procede a la simulación.

8.2.6.3. Criterios para la numeración de celdas, nodos y elementos del modelo y estructura del archivo del modelo

FATSIM-A genera automáticamente la numeración de celdas siguiendo el criterio ya mencionado de 2(posición horizontal)+2(posición vertical) dígitos. Los nodos y celdas

asociados al circuito de concentración añaden una 'c' a la numeración mientras que los correspondientes a la función de corriente añaden una f. Esta misma nomenclatura se sigue para nombrar los subcircuitos (conjunto de componentes eléctricos del modelo que implementan las ecuaciones en diferencias finitas aplicadas a la celda). Para distinguirlo de los demás, cada subcircuito tiene una denominación propia (asociada a la celda que implementa).

El nudo correspondiente al centro de la celda se define igual que la propia celda, los nudos de los bordes izquierdo y derecho llevan una x al final de su denominación mientras que los nudos inferior y superior llevan una y. También, los nudos izquierdo e inferior de la celda tienen la misma numeración que el central mientras que el derecho y superior tienen una unidad más en la coordenada correspondiente (x e y, respectivamente). De esta forma es inmediato establecer una correspondencia entre nudos y posiciones locales del medio en unidades de longitud. Un detalle de esta numeración se muestra en la misma figura 8.15.

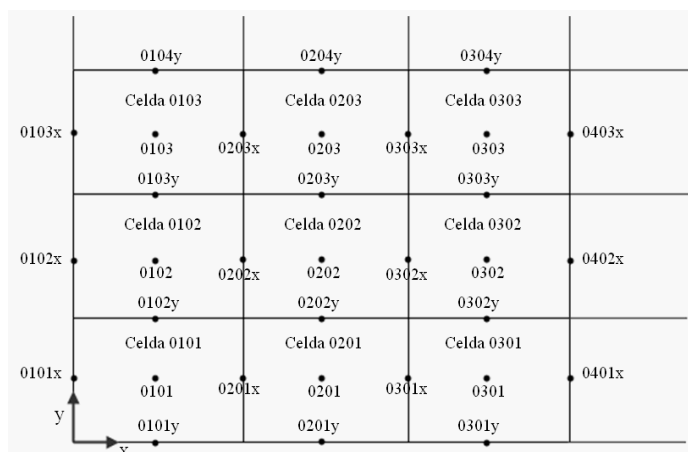


Figura 8.15. Numeración de celdas y nodos

Finalmente, en relación con la estructura del archivo, aunque ésta no necesita seguir regla alguna, FATSIM-A ha querido hacerla uniforme para permitir al usuario acceder directamente a la zona del archivo interesada. Está dividida en los siguientes bloques (por este orden):

- Nombre del archivo (con la opción de incluir, a continuación del nombre, una descripción general del problema),
- Parámetros físicos, geométricos y de reticulación,
- Descripción de los subcircuitos (isoconcentración y función de corriente) de las celdas correspondientes a cada capa, especificando los componentes de los mismos y la denominación de sus nudos internos,
- Listado de interconexión de subcircuitos, especificando el nombre del subcircuito y la numeración de nudos externos,

- Listado de elementos que implementan las condiciones de contorno de cada variable, indicando el tipo de elemento, su valor y los nudos de conexión,
- Listado de variables a imprimir, y
- Sentencias de opciones de simulación

8.2.6.4 Pantallas de presentación de resultados

Una vez creado yo/ guardado el archivo del modelo, su ejecución es inmediata pulsando el botón ‘Simular’ de la pantalla ‘Simulación de malla’, o bien mediante el botón ‘Generar y simular’ de la pantalla principal. Esta acción arranca PSpice y ejecuta el modelo presentando la pantalla propia del ambiente Pspice, figura 8.16. Ésta contiene tres zonas separadas: la superior, donde se muestra el archivo de texto del modelo en ejecución; la inferior izquierda que proporciona información de los posibles errores del modelo (caso de no convergencia o errores de circuito) y la inferior derecha donde se muestra el intervalo temporal de la simulación y el tiempo de paso de la misma, así como el porcentaje de tiempo simulado. El programa PSpice varía continuamente el tiempo de paso de simulación, de acuerdo con la tendencia uniforme o cambiante de los resultados en curso, para reducir al máximo (sin merma de la precisión especificada por el programador para los resultados numéricos) los tiempos de computación totales.

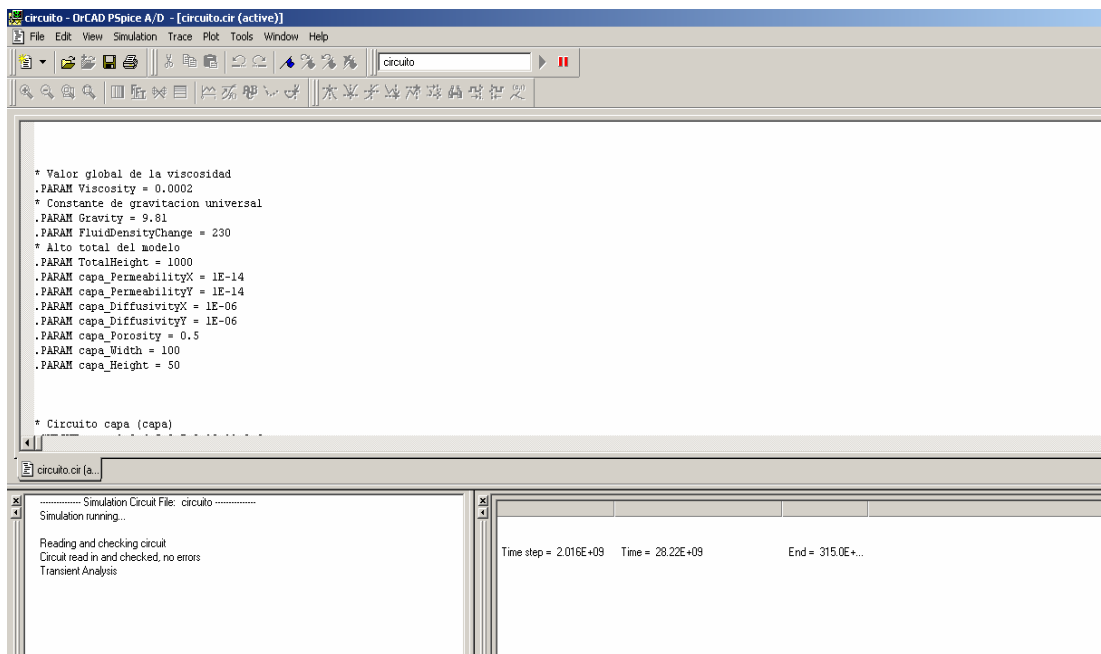


Figura 8.16. Pantalla del ambiente Pspice con información del proceso de simulación

Si se ha incluido la opción de presentación de resultados en el entorno de Pspice (sentencia “.PROBE”), una vez finalizada la simulación FATSIM-A muestra directamente el entorno gráfico de Pspice consistente en una cuadrícula en cuyo eje horizontal se muestra una escala de tiempos y en el vertical los valores numéricos de la variable o variables que se

soliciten. Para salvar la limitación de Pspice de no poder realizar representaciones 2-D o animaciones en problemas transitorios, FATSIM-A incorpora un módulo gráfico 2-D propio e integra rutinas que permiten transportar los datos tabulados de salida de Pspice a MATLAB, para obtener representaciones más precisas. Las figuras 8.17, 8.18 muestran las pantallas de manejo del entorno gráfico de MATLAB, mientras que la 8.19 corresponde a la opción de generar animaciones.

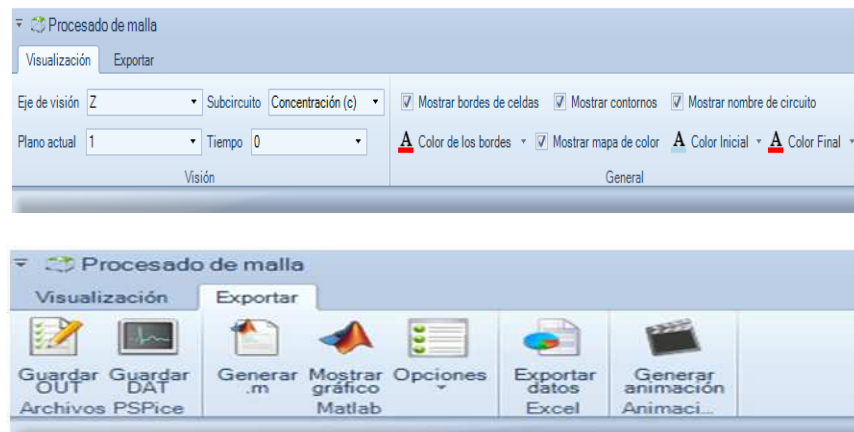


Figura 8.17. Pantallas de procesado de malla para representaciones gráficas y animaciones

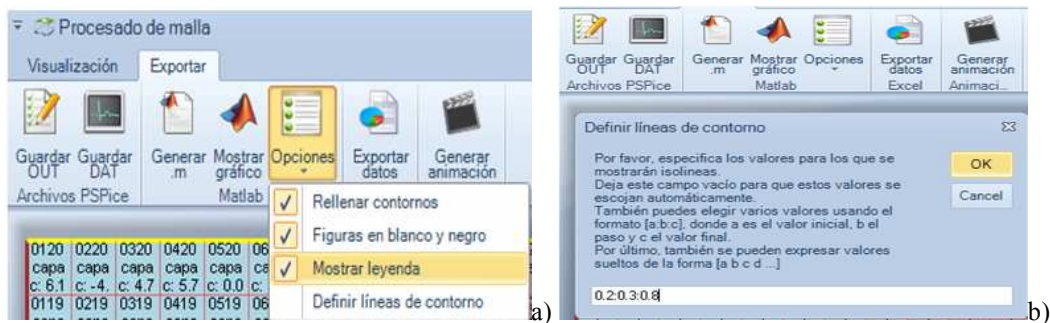


Figura 8.18. Pantalla para representaciones en MATLAB.
a): Opciones de representación, b). Definición de isolíneas

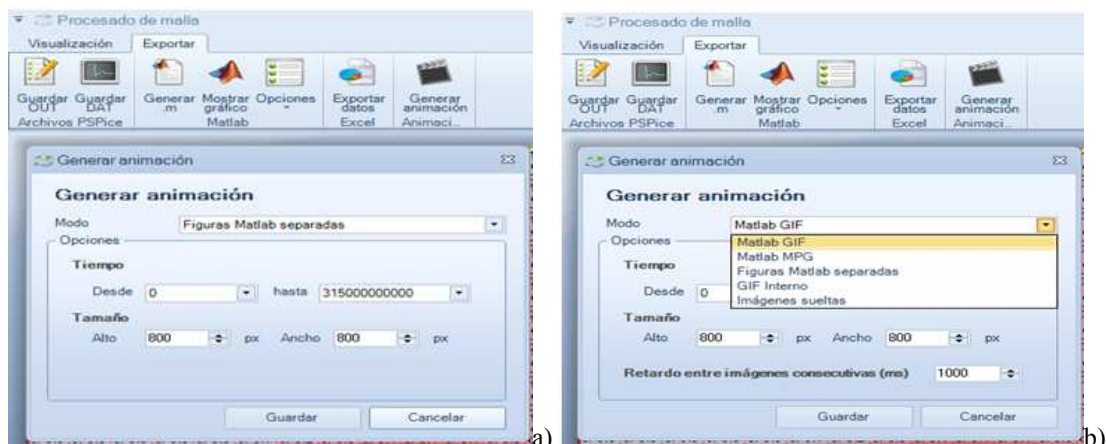


Figura 8.19. Pantalla de generar animaciones
a): Formato de especificación, b): Opciones de tipo de archivo

Un ejemplo de representación en entorno propio de FATSIM-A y en entorno MATLAB (para un mismo problema) se muestra en las figuras 8.20 y 8.21, respectivamente.

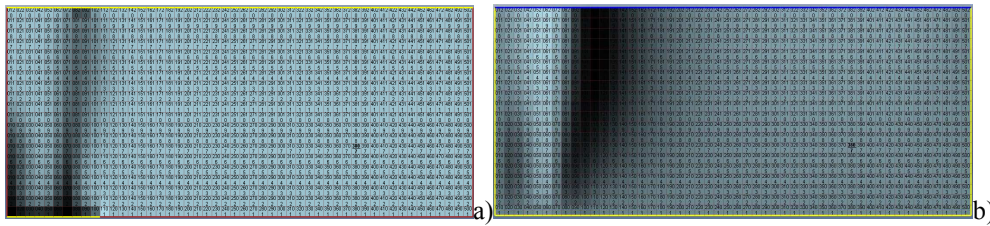


Figura 8.20. Isolíneas típicas del entorno FATSIM-A. a): concentración, b): función de corriente

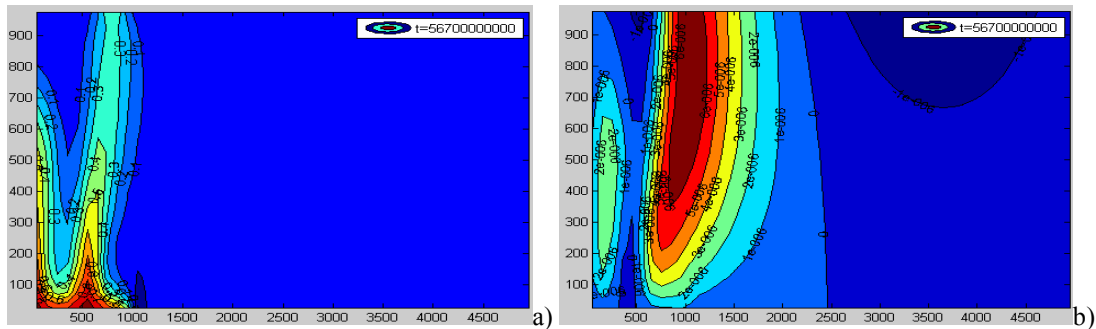


Figura 8.21. Gráficos MATLAB de las representaciones de la figura 8.20.
a): isolíneas de concentración, b): ídem de función de corriente

El trabajo de interpolación en el entorno FATSIM-A se realiza mediante rutinas propias incorporadas al programa mientras que la interpolación en las representaciones MATLAB la realiza este código con sus propios algoritmos (más precisos). Para ello es preciso añadir a cada dato de salida de Pspice toda la información necesaria para su correcta representación gráfica: coordenadas independientes del dato, número de celdas, ajuste de la interpolación, etc. Para este trabajo se han elaborado dos rutinas en C# Visual Studio .Net, Versión 1; un lenguaje de programación de alto nivel orientado a objetos y diseñado por Microsoft (2001) como parte de su entorno de trabajo.

8.3. CREACIÓN DEL MODELO BÁSICO DE SEAWAT

8.3.1. GEOMETRÍA, MALLADO Y PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

El esquema del modelo conceptual se ha expuesto en el apartado 7.7.1. En función de la geometría definida para el acuífero en los apartados 7.3 y 7.4, las coordenadas geográficas que limitan la extensión del modelo se muestran en la tabla 8.5. Con objeto de simular la condición de contorno del mar se ha incorporado un dominio al este de la línea de costa de longitud 450 m. La extensión en planta del modelo es de 3500(norte-sur)×2500(este-oeste) m, lo que equivale a una superficie de 8,75 km². De ésta se han eliminado las regiones que quedan fuera de los límites del acuífero (zona coloreada de la figura 8.22), de acuerdo con los

afloramientos de margas del Plioceno inferior (al norte) y el umbral piezométrico que se alinea con las pistas del aeropuerto. En cuanto a la extensión vertical (de acuerdo con la topografía del terreno y la profundidad estimada del techo de las margas del Plioceno inferior), en superficie las cotas se encuentran entre 10 (al oeste) y 0 (al este) m s.n.m., mientras que en la base las cotas oscilan entre -70 (al oeste) y -82 (al este) m s.n.m., lo que supone un espesor medio de 80 m (figura 8.23).

	Vértice inferior izquierdo	Vértice inferior derecho	Vértice superior izquierdo	Vértice inferior izquierdo
X	713998	717498	713998	717498
Y	4239759	4239759	4243259	4243259

Tabla 8.5. Coordenadas geográficas de los vértices del modelo

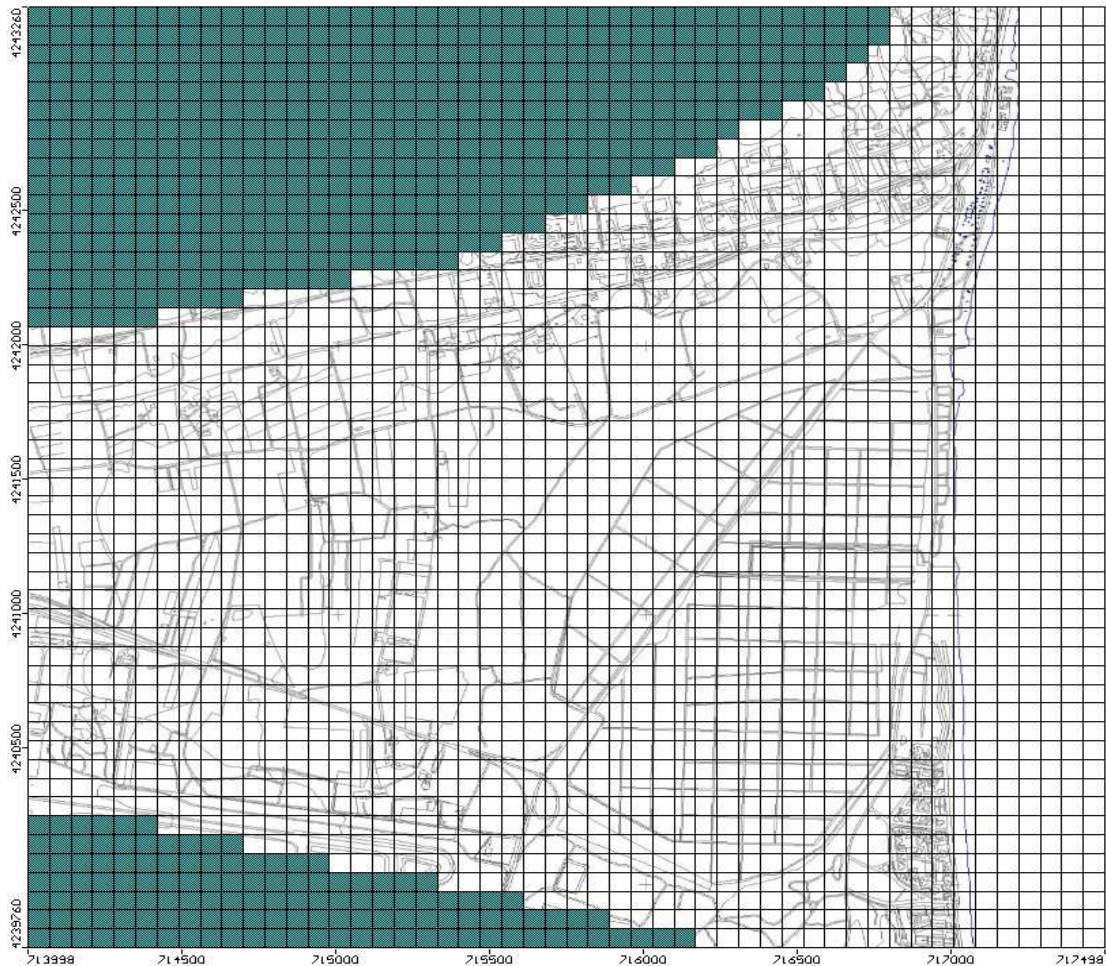


Figura 8.22. Mallado en planta del modelo

El tamaño de celda escogido es de 50(en dirección norte-sur)x70(dirección este-oeste) m en planta, lo que equivale a 50 filas y 50 columnas, de acuerdo con las dimensiones. Con objeto de poder diferenciar las regiones de diferente conductividad, se ha adoptado un número

de capas de 6 (numeradas de 1 a 6 en dirección descendente); el espesor de las capas 2 y 3 (8 m) es la mitad de las restantes (16 m), a fin de refinar los resultados de la simulación en esa zona. La distribución de las capas se ilustra en la figuras 8.23 y 8.24.

Con todo, el número de elementos o celdas del modelo es de 11370. Este mallado, adoptado tras una serie de simulaciones, supone un compromiso entre una precisión aceptable de los resultados y un tiempo de computación razonable (los escenarios reproducidos por el modelo, que se definen más adelante, han requerido tiempos de computación en SEAWAT de aproximadamente 50 minutos cada uno). Por otro lado, la elección del espesor de las capas está condicionada por el hecho de que el programa da problemas de convergencia cuando las celdas superficiales se secan, como ocurre con las situadas junto a las captaciones.

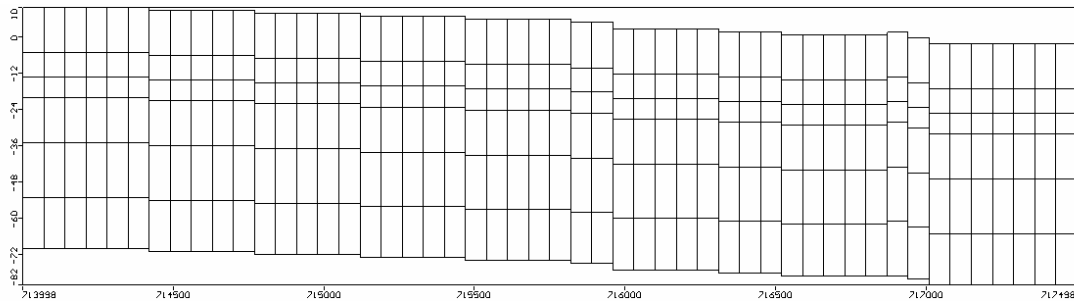


Figura 8.23. Sección vertical oeste-este, ilustrando las capas del modelo

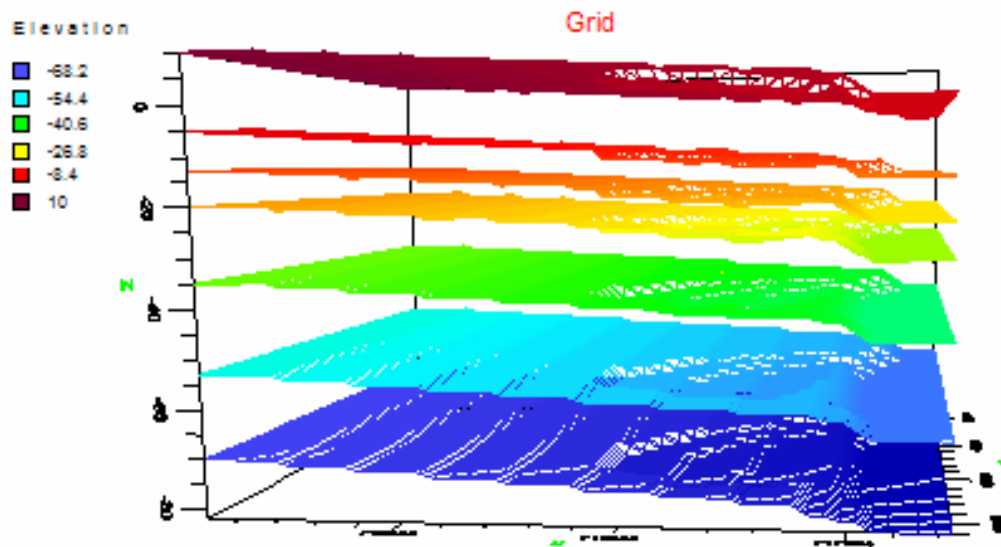


Figura 8.24. Imagen ilustrativa de la distribución de capas del modelo

Los valores de conductividad hidráulica se listan en la tabla 8.6. Su distribución en el acuífero se muestra en la figura 8.25, que corresponde a una sección cualquiera oeste-este. El resto de los parámetros hidrogeológicos se muestra en la tabla 8.7. Se ha adoptado para la

dispersividad los valores que por defecto toma Modflow, y que coinciden aproximadamente con las recomendaciones de otros autores (Custodio y Llamas, 1983; FCIHS, 2009). La difusividad molecular, entre 10^{-4} y 10^{-5} m/d, no se ha considerado por ser varios ordenes de magnitud inferior al producto de la dispersividad (10 m) por la velocidad regional ($1057,2/(70 \cdot 50) = 0,30$ m/d), $3 \text{ m}^2/\text{d}$.

K (m/d)	Distribución de celdas (figura 8.3)	Espesor de la capa (tabla 7.1)	Correspondencia litológica (tabla 7.1)
10-150	Zona color blanco	50	Capa 4
0,8-0,0003	Zona color magenta	32	Capa 3
16-150	Zona color azul marino	24	Capa 2
20-60	Zona color verde	8-32	Transición entre capas 2 y 3

Tabla 8.6. Conductividades hidráulicas del modelo y su distribución

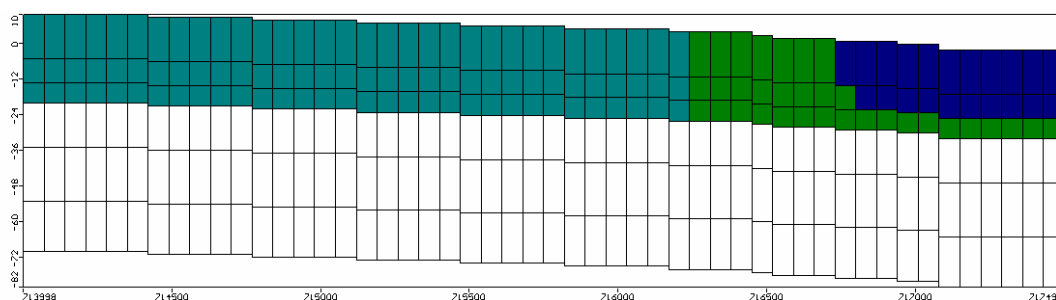


Figura 8.25. Distribución en profundidad de la conductividad hidráulica (sección oeste-este)

Parámetro	Valor
Porosidad efectiva	0,15
Densidad del agua	Saladar: 40-80 g/l
	Mar: 40 g/l
	Continente: 6,2 g/l
	Recarga lluvia: 0 g/l
Dispersividad (α)	Longitudinal α_l : 10 m
	Transversal α_t : 1 m
	Vertical α_v : 0,1 m
Difusión molecular (D_m)	$0 \text{ m}^2/\text{d}$

Tabla 8.7. Parámetros hidrogeológicos del modelo

8.3.2. CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno (flujo y concentración) se sintetizan en la tabla 8.8, de la que cabe destacar lo siguiente:

- Como recarga por infiltración se ha adoptado, para todo el periodo de simulación, el valor medio calculado en el apartado 7.7 (condición 1a); para reflejar el efecto de las lluvias torrenciales de septiembre de 2009, se ha recogido el valor correspondiente a ese mes, Anexo 10, (condición 1b).

Condición	Condición de flujo	Valor	Dónde se aplica	Periodo de aplicación
1a	Recarga por infiltración	60 mm/a (valor medio de recarga)	Superficie del acuífero	Continuo (salvo periodo 1b)
1b	Recarga por infiltración (apartado 7.7)	651 mm/a	Superficie del acuífero	30 días sep-09
2	Caudal de entrada (apartado 7.7)	7,12 hm ³ /a (750,3 m ³ /d por pozo)	Borde oeste del acuífero, mediante 26 pozos de inyección con rejilla a lo largo de todo el espesor	Continuo
3	Piezometría constante	0 m s.n.m.	Celdas en contacto directo con el mar y columna del límite este del modelo	Continuo
4	Recarga desde el saladar	18250 mm/a	Celdas de la superficie del saladar	50 años 1925-1975
5	Vertidos con agua de mar sobre el saladar	0.737 hm ³	Superficie de vertidos (370000 m ²)	240 días dic-09/jul-10
6	Extracciones DA-I	45.96 hm ³ /a	6 pozos de 55 m de profundidad con rejilla a partir de 10 m de profundidad (tabla 5.1)	7.33 años sep-03/dic-10
7a	Extracciones DA-II	29.21 hm ³ /a	20 pozos	1.23 años sep-08/dic -09
7b	Extracciones DA-II	8.736 hm ³ /a	20 pozos	1.068 años dic-09/ene-11
8	Flujo nulo (impermeabilidad)		Base de las celdas inferiores, celdas inactivas y celdas de los contornos laterales norte y sur	Continuo
Condición	Condición de concentración	Valor	Dónde se aplica	Periodo de aplicación
9	Concentración constante	40 g/l	Celdas en contacto directo con el mar y columna del límite este del modelo	Continuo
10	Concentración constante	6,2 g/l	Borde oeste del acuífero	Continuo
11	Concentración constante	80 g/l	Celdas de la superficie del saladar	1925/dic-09 y a partir de julio-10
12	Concentración del agua de infiltración	40 g/l	Celdas de vertidos	240 días dic-09/jul-10
13	Concentración agua de lluvia	0 g/l	Celdas de la superficie del acuífero	continuo

Tabla 8.8. Condiciones de contorno del modelo

- En relación con la salinidad de las aguas continentales, merced a los resultados del análisis químico del agua del piezómetro P-4 no influenciado por el saladar (Anexo 7), se le ha atribuido una concentración de 6,2 g/l.
- El valor de recarga asociada a la actividad salinera (condición 4) se estimó a partir del caudal de entrada desde una balsa con un lecho de conductividad $K=0,5$ m/d (capa 1, tabla 7.1) y espesor de 3 m, con una carga hidráulica de 0,3 m (altura de agua en la balsa). La asignación de una concentración para esta recarga (condición 11) es un problema difícil, en tanto que la concentración en las balsas oscila aproximadamente entre 40 g/l (agua de mar) y 300 g/l (nivel de concentración para la precipitación de cloruros). El valor adoptado (80 g/l) se justifica en base a los valores medios de conductividad eléctrica de la mayoría de los piezómetros en el área de influencia del saladar y en la línea de costa.

- El valor de recarga por infiltración correspondiente a los vertidos sobre el saladar (obtenido a partir de los datos de la tabla 7.12) es de 3026 mm/a.
- Debido a las variaciones en el régimen de explotación de la DA-II, se han establecido dos periodos de explotación con valores medios diferentes (figura 6.2). Para simplificar, se ha considerado que el volumen extraído procede del túnel de drenaje, ya que sólo una pequeña parte del mismo proviene de los PHD (como se explicó en el apartado 7.7). El drenaje se simula mediante pozos de extracción con rejillas comprendidas entre -10 y -42 m s.n.m., para cubrir el dominio de captación de los sondeos inclinados del túnel.

8.3.3 ESCENARIO 1: CUÑA DE INTRUSIÓN PREVIA A LA INTERVENCIÓN ANTRÓPICA

En esta simulación se plantea un escenario correspondiente a la situación inicial previa a la instalación de la industria salinera. Las condiciones de contorno correspondientes son 1a, 2, 3, 8, 9, 10 y 13 de la tabla 8.8. Con ello se pretende obtener información sobre la situación estacionaria inicial de la cuña de intrusión y de la piezometría del acuífero, así como información de los flujos de agua subterránea. Con todo, los resultados de esta simulación servirán como punto de partida para las siguientes. Aunque las condiciones estacionarias se alcanzan alrededor de los 20 años, se ha simulado un periodo de 40 años.

La figura 8.26, que responde a una representación típica de intrusión salina en acuíferos costeros, presenta el estado estacionario de la cuña resultado de la simulación. La superficie del borde de la cuña de la figura corresponde a una concentración de 10 g/l. Como se observa, el pie (isolínea de 10 g/l) penetra en la base del acuífero una distancia de más de 200 m en la parte central, medida desde la línea de costa, mientras que en el norte esta distancia es superior a 400 m, lo que se justifica en ambos casos por los bajos caudales del flujo regional.

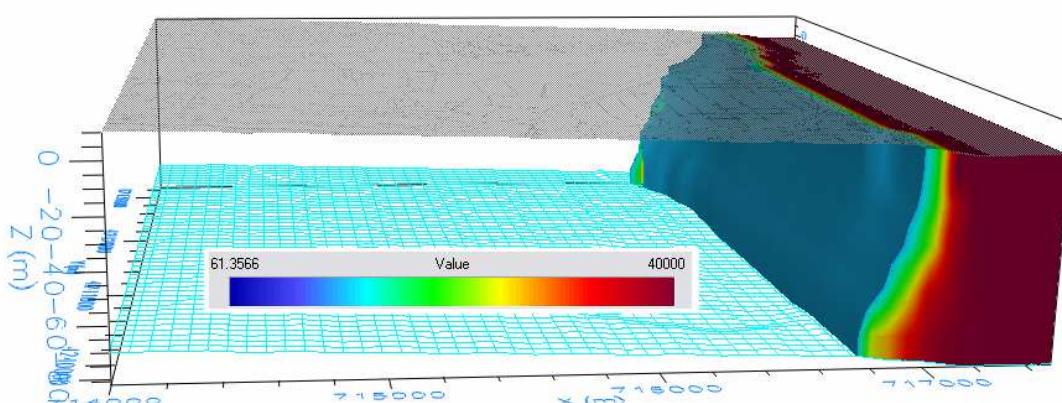


Figura 8.26. Ilustración 3-D de la cuña de intrusión inicial

Las figuras 8.27 a y b muestran un detalle en sección de los pies de intrusión e isopiezas en las filas 5 y 26, respectivamente. El efecto de la infiltración de agua dulce queda reflejado en la figura 8.27b, en la que aparece un gradiente de concentración bajo la superficie.

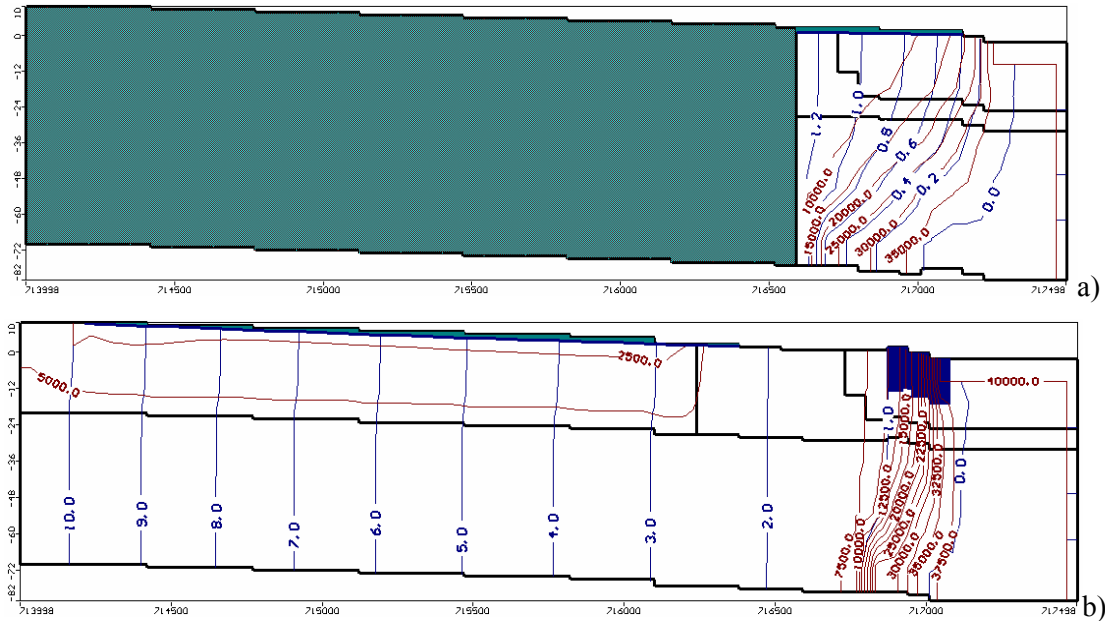


Figura 8.27. Líneas de isoconcentración y piezometría en las filas 5 (a) y 26 (b)

Para justificar la relación entre los caudales y la penetración de la cuña de intrusión, se ha realizado un balance hídrico en los dominios verde y azul ilustrados en la figura 8.28. Los resultados del balance se ilustran en figura 8.29. En torno al dominio verde, donde la cuña de intrusión es más penetrante (fila 5, figura 8.27a), el caudal de salida es de $1513 \text{ m}^3/\text{d}$, mientras que en el dominio azul (fila 26, figura 8.27b), donde la cuña de intrusión es menos penetrante, el caudal es tres veces mayor, $4554 \text{ m}^3/\text{d}$.

La figura 8.28 también representa la distribución de isolíneas, en planta, de la capa 1 del modelo. El gradiente hidráulico disminuye hacia el mar debido al ensanchamiento del acuífero y al aumento de conductividad hidráulica en dirección oeste-este.

Las figuras 8.30a, b y c ilustran trayectorias de partículas en el acuífero. Puede apreciarse claramente una región de mezcla agua dulce-agua salada (interfase) con movimientos de recirculación. Las partículas de flujo de mayor concentración, procedentes de la región inferior este (bajo el mar), penetran en el acuífero y se mezclan con el agua continental dando origen a un movimiento ascendente, mientras que las partículas que parten desde el continente se dirigen hacia la línea de costa en un movimiento ascendente condicionado por los cambios de conductividad hidráulica (que explican los saltos) y por la posición de la interfase.

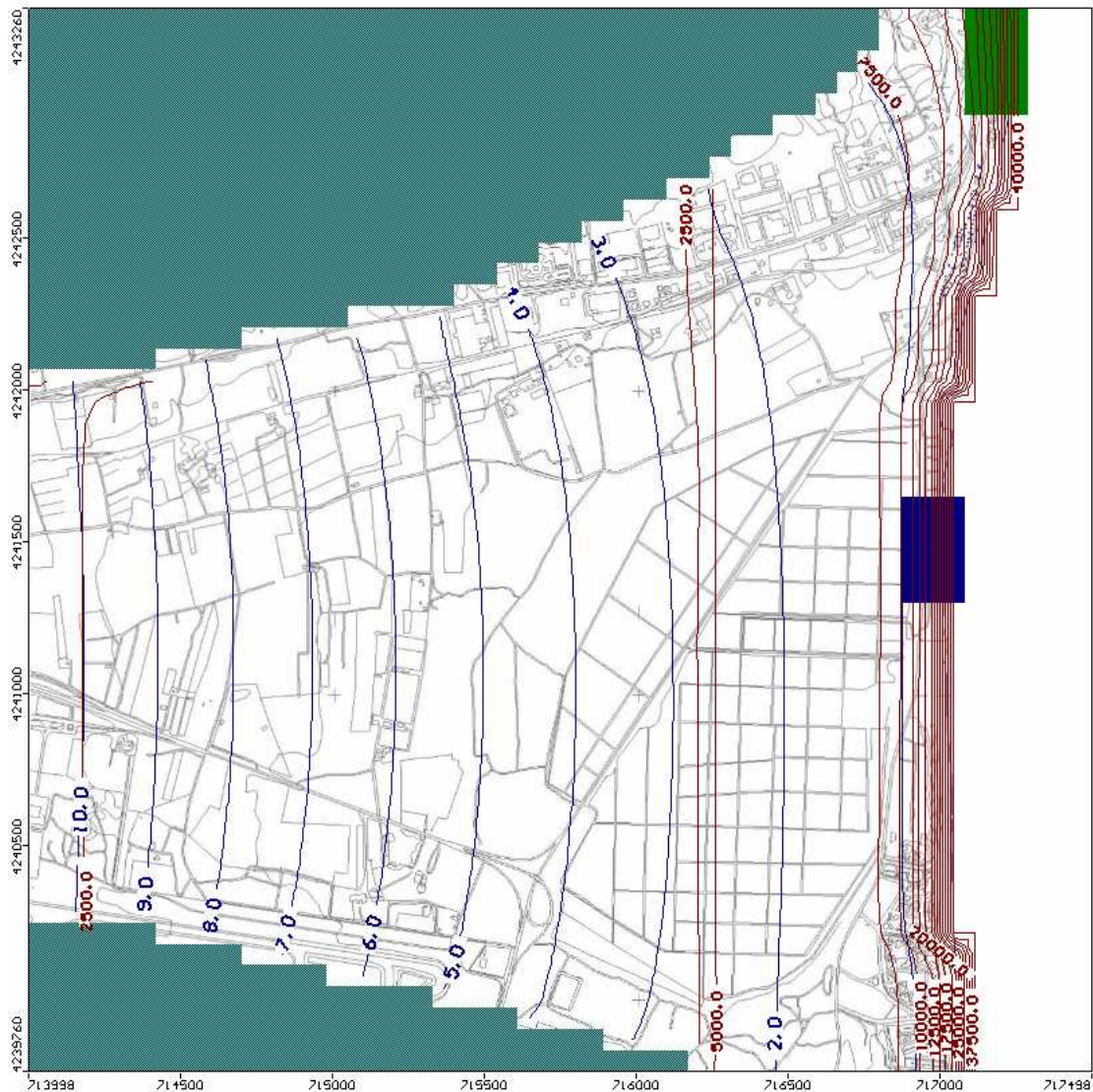


Figura 8.28. Distribución en planta de líneas isopiezas e isoconcentración de la capa 1 del modelo

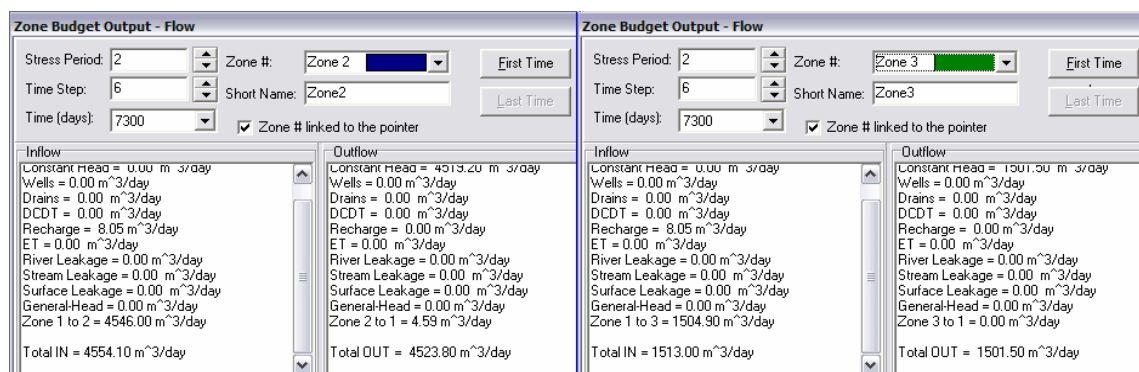


Figura 8.29. Balance hídrico en los dominios verde y azul de la figura 8.28

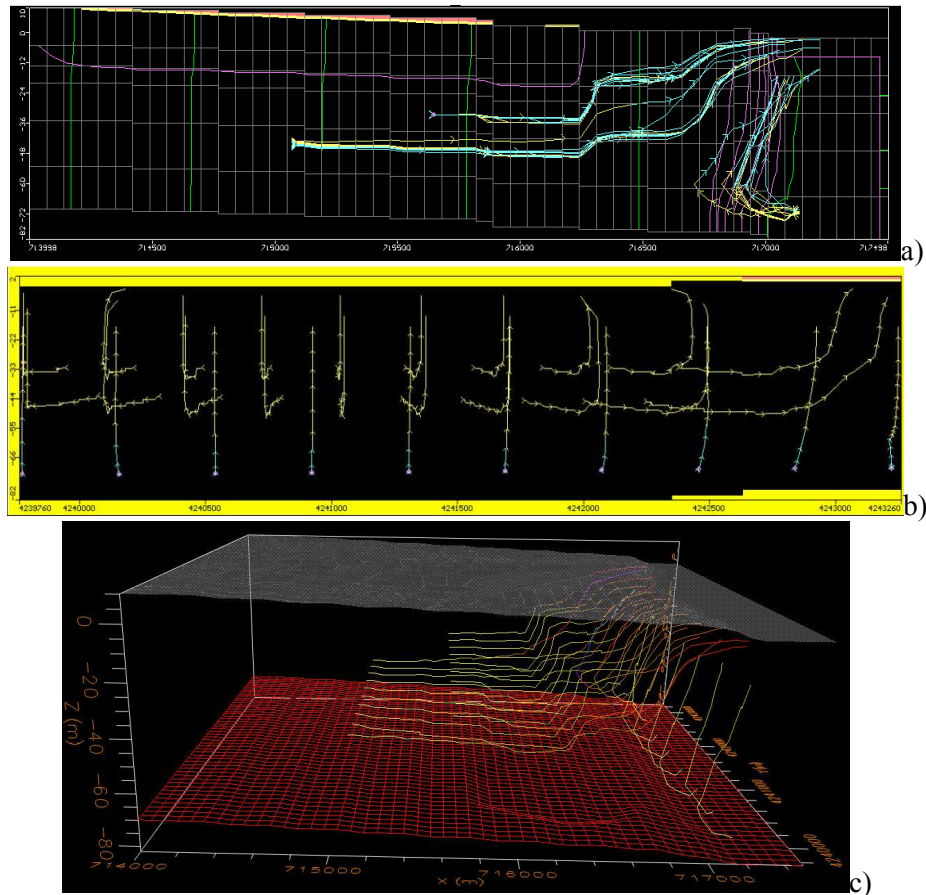


Figura 8.30. Trayectorias de partículas de flujo en fila 26 (a), columna 45 (b) y dominio completo (c)

8.3.4 ESCENARIO 2: EXPLOTACIÓN SALINERA

Partiendo de los resultados de la simulación anterior se genera un nuevo escenario en el que se implementa una lámina de agua salada permanente de altura 0.4 m (espesor típico de las lagunas de explotación salinera) con un lecho de 0.5 m de espesor de sedimentos de conductividad hidráulica 0.5 m/d, valores correspondientes a la capa de fango y arena fina con sal y yeso (tabla 7.1). La concentración del agua de la laguna se ha considerado de 80 g/l; como se mencionó en el apartado 7.6.4, la concentración en las balsas salineras oscila entre 40 y 300 g/l. Las condiciones de contorno correspondientes son, pues, 1a, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11 y 13 de la tabla 8.8. De nuevo, los resultados de esta simulación se implementarán en el siguiente escenario. Se ha simulado un periodo de 50 años, duración de la actividad salinera, aunque el estado estacionario se alcanza aproximadamente a los 10 años.

La figura 8.31 ilustra sobre el estado de concentración en el acuífero afectado por la actividad salinera. Se aprecia, en primer lugar, la modificación de la superficie frontera correspondiente a 10 g/l en relación con esta misma superficie en el escenario anterior (figura 8.26). Por otro lado, los valores máximos de salinidad, coincidentes con la concentración de las aguas de recarga, se dan en la región bajo el saladar que queda contaminada en su totalidad.

La figura 8.32 muestra la distribución de isolíneas de concentración y piezometría en la sección correspondiente a la fila 36. Se destaca la inversión de la cuña de intrusión bajo el mar, y la formación de una nueva cuña, por efecto del saladar, cuyo pie (isolínea de 10 g/l) penetra en el continente hasta una distancia aproximada de 1300 m.

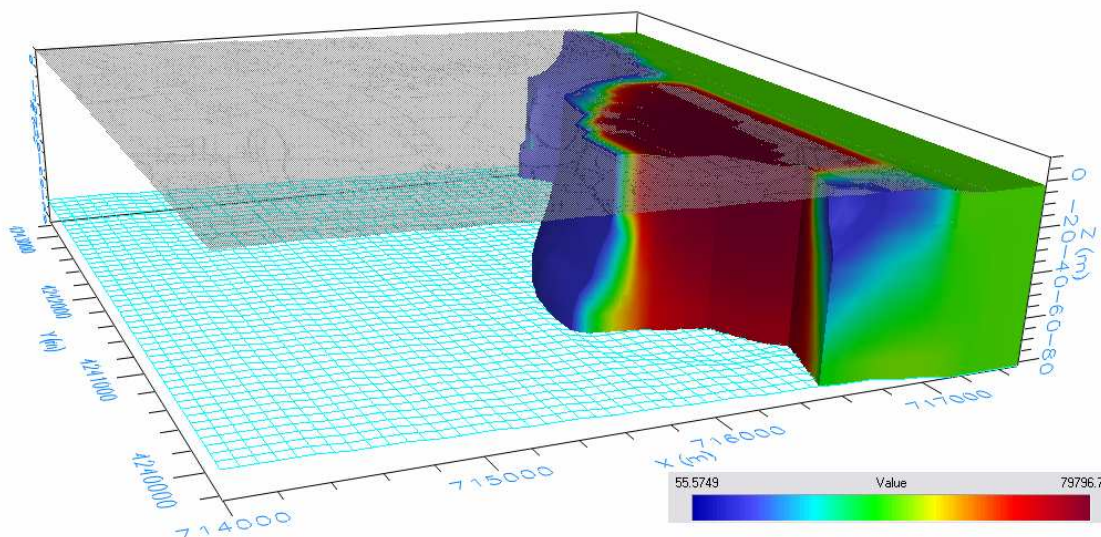


Figura 8.31. Ilustración de la cuña de intrusión en presencia del saladar

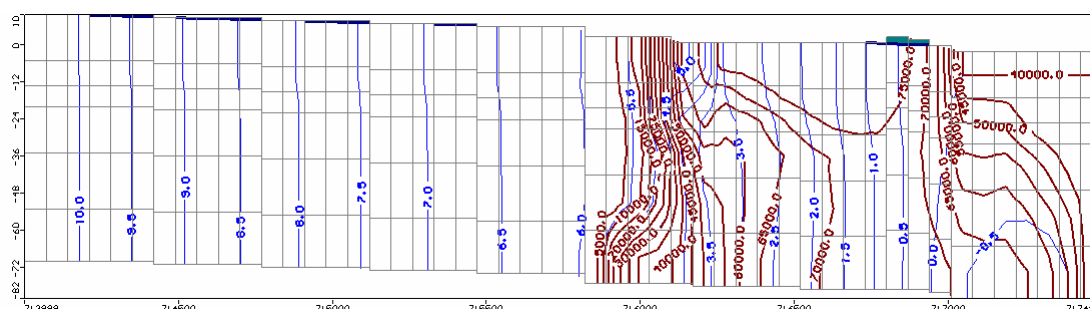


Figura 8.32. Distribución de isopiezas e isoconcentraciones en una sección vertical (fila 36)

La figura 8.33 muestra una vista en planta de la distribución de líneas isopiezias (azul claro) y líneas de isoconcentración (verde claro) de la capa 1 del modelo, así como las trayectorias de las partículas. En relación con la distribución de líneas isopiezias, se aprecia una distorsión general respecto al mapa correspondiente al escenario 1 (figura 8.28). El gradiente hidráulico al oeste del saladar disminuye debido al efecto barrera que produce la condición de concentración y flujo impuesta sobre el saladar. Finalmente, las trayectorias de las partículas divergen en su camino hacia el mar para soslayar el obstáculo del saladar.

Un detalle del complejo recorrido de las partículas bajo este escenario puede apreciarse en la figura 8.34a, en la que se ha representado sólo dos trayectorias que parten de la fila 36. Las partículas abandonan este plano y se dirigen hacia el borde noreste del acuífero, en un recorrido serpenteante hasta encontrar el mar (figuras 8.33 y 8.34a). En la figura 8.34b se representan, en 3-D, trayectorias de distintas partículas.

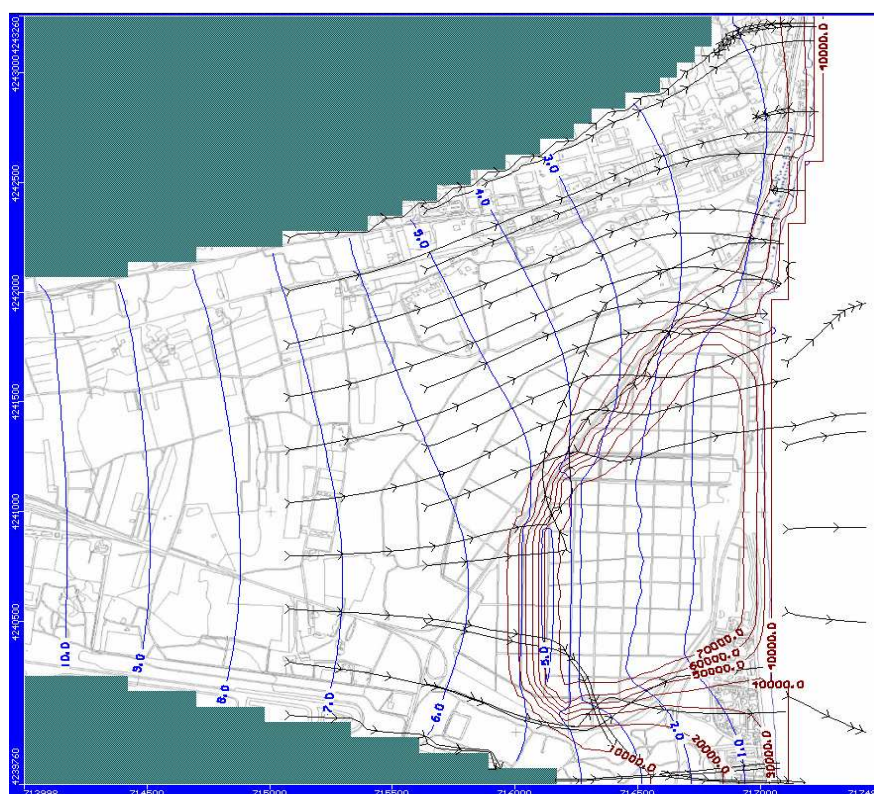


Figura 8.33. Distribución en planta de líneas isopiezas e isoconcentración de la capa 1 y trayectoria de partículas

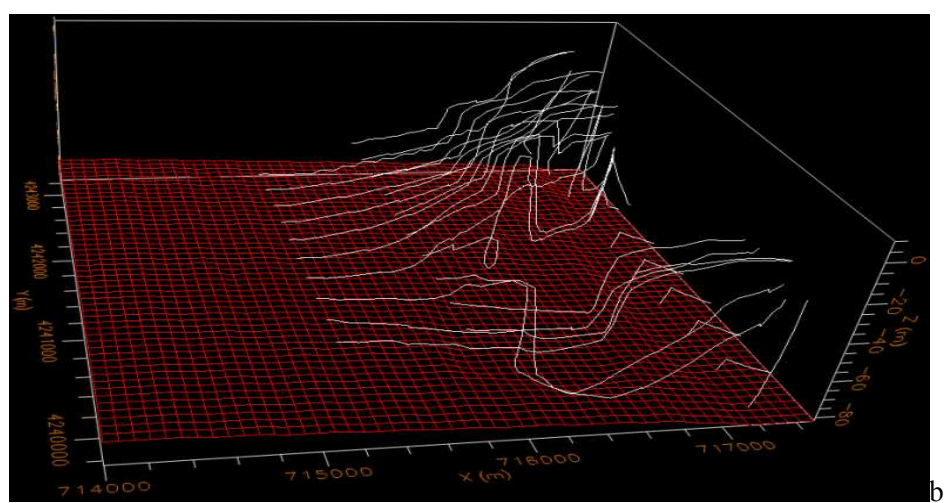
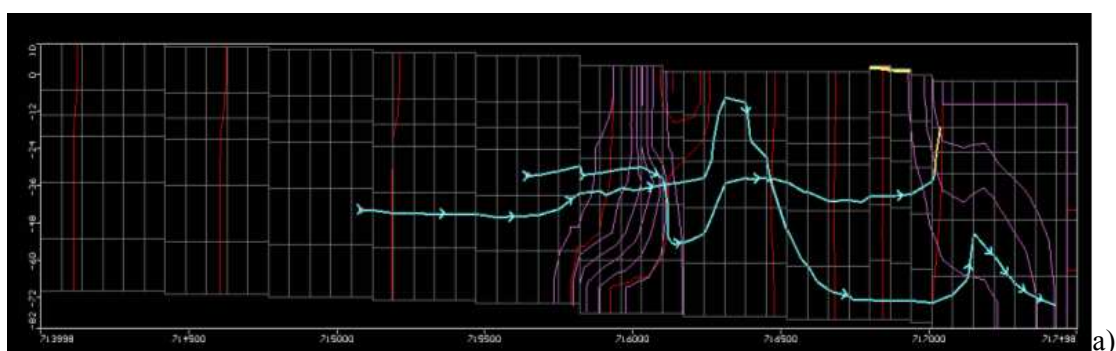


Figura 8.34. Trayectoria de dos partículas en que parten de la fila 36 (a) y trayectoria en 3-D de diferentes partículas

8.3.5 ESCENARIO 3: PERIODO ENTRE FIN DE LA EXPLOTACIÓN SALINERA Y ARRANQUE DE LA DA-I

El fin de la industria salinera, en torno a 1975, viene seguido de un periodo de casi 30 años en el que el acuífero evoluciona de forma natural, sin intervenciones antrópicas, hasta el arranque de la DA-I en 2003. El régimen de flujo durante este periodo está condicionado por la elevada salinidad tanto de los terrenos como de las aguas bajo el saladar. Este escenario se simplifica asumiendo una condición de contorno de concentración constante en las celdas situadas en la superficie. Con ello se pretende reproducir la aportación de sal (al agua subterránea) procedente de los cristales presentes en el terreno y generados por la actividad salinera. Por otra parte, se elimina la condición de flujo que, debido a la lámina de agua, producía la infiltración desde la superficie. Con todo, las condiciones de contorno son las enumeradas como 2, 3, 8, 9, 10, 11 y 13 de la tabla 8.8. Se ha simulado un periodo de 30 años, si bien el estacionario tiene lugar en torno a los 10.

La ausencia de infiltración asociada a la lámina de agua (condición de contorno 4) provoca cambios sustanciales en la distribución de sal en el acuífero, como puede apreciarse en la figura 8.35 en la que se ha practicado un corte para apreciar mejor las concentraciones bajo el saladar. El aspecto de las isosuperficies de concentración, con la emergencia de ‘fingers’ (Holzbecher, 1998), es propio de escenarios de este tipo, en donde los flujos asociados a los gradientes de densidad en la zona de mezcla generan movimientos de recirculación. Al no existir carga hidráulica desde la superficie, la contaminación no alcanza la misma extensión que en el escenario 2.

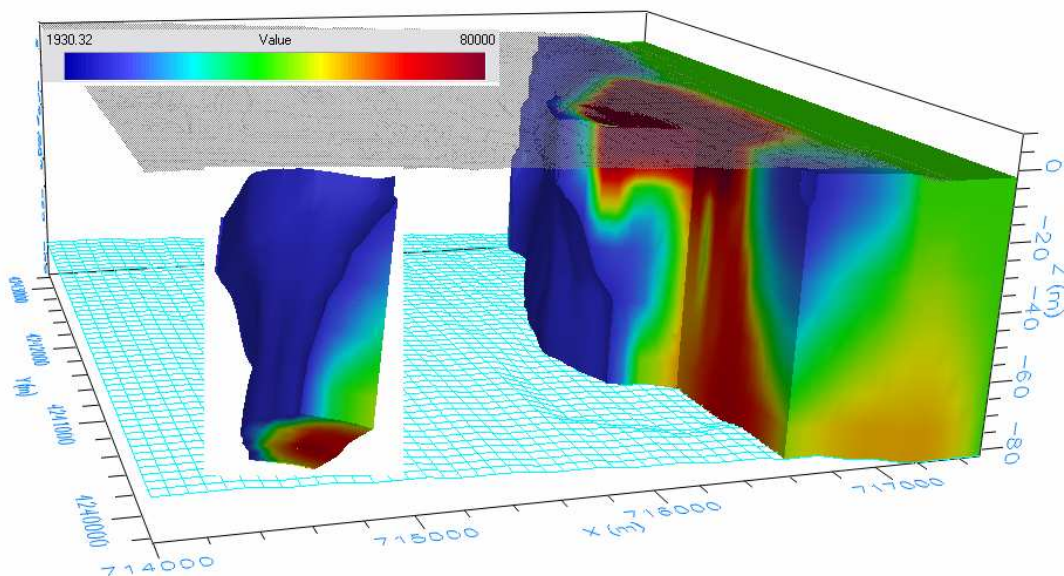


Figura 8.35. Distribución estacionaria de concentraciones del escenario 3

La figura 8.36 muestra un detalle de las isopiezas e isolíneas de concentración en una sección típica del acuífero que pasa por el saladar (fila 36). En ella se ve como el frente correspondiente a la isopieza 10 g/l se ha retraído hacia el este, quedando a una distancia aproximada de 700 m de la línea de costa, produciendo una descontaminación parcial bajo el saladar. No obstante, se mantiene una bolsa de agua salada en el fondo del acuífero, entre el saladar y la línea de costa, así como la inversión de la cuña de intrusión en la zona de costa.

La distribución en planta de isolíneas, así como las trayectorias de algunas partículas, se muestra en la figura 8.37. Desaparece la divergencia entre las trayectorias en su dirección hacia el saladar merced a la eliminación de la condición de flujo de infiltración, lo que permite la existencia de un flujo continental que cruza la zona de mezcla (a diferencia del escenario anterior). Así mismo, se produce una homogenización del gradiente hidráulico alrededor del saladar. Finalmente, se aprecia una retracción global de las líneas de isoconcentración.

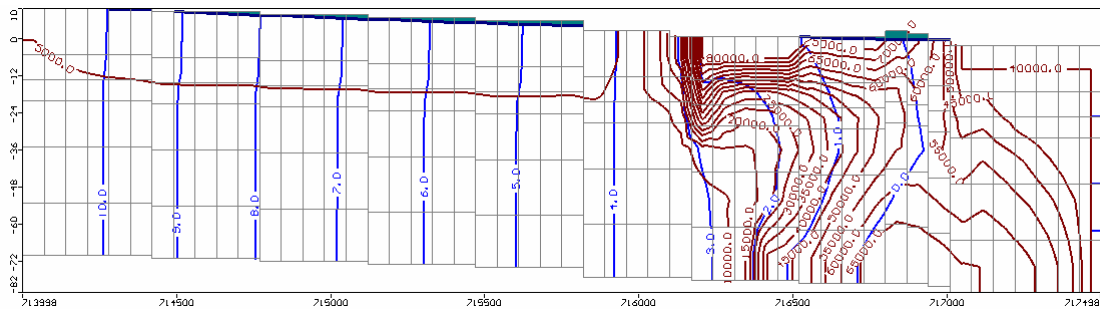


Figura 8.36. Isolíneas de concentración y piezometría de la fila 36

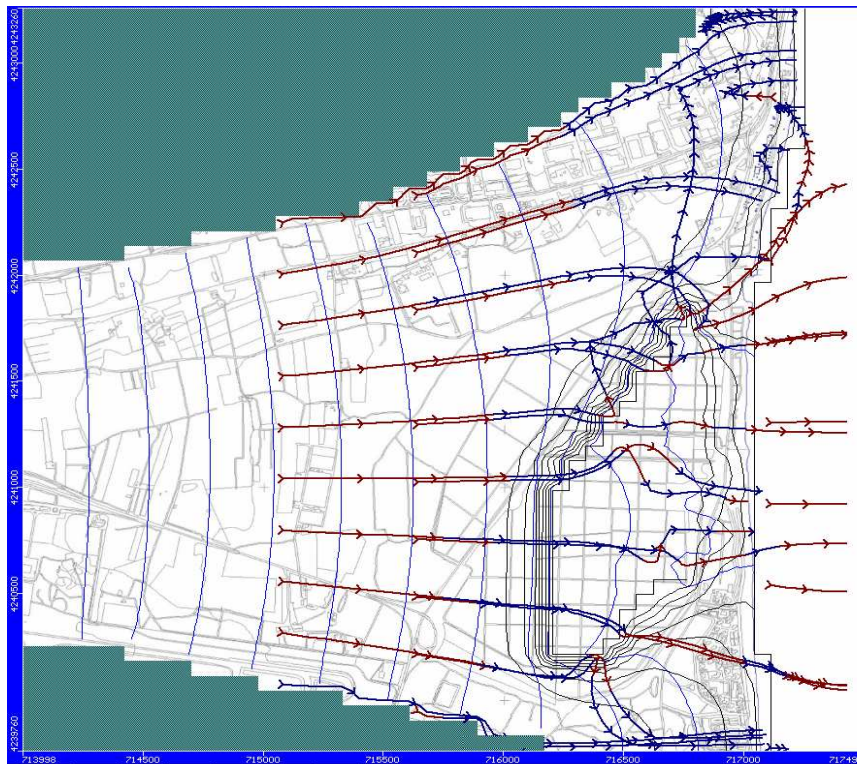


Figura 8.37. Distribución en planta de isolíneas y trayectorias de partículas

Con objeto de ilustrar el cambio de distribución de isolíneas con la profundidad, la figura 8.38 muestra mapas de éstas para las capas 3 y 6. La dispersión asociada al flujo bajo el saladar produce una expansión relativa entre líneas de isoconcentración, que afecta también a las isopiezas en esa región. Fuera de la misma las isopiezas apenas cambian con la profundidad.

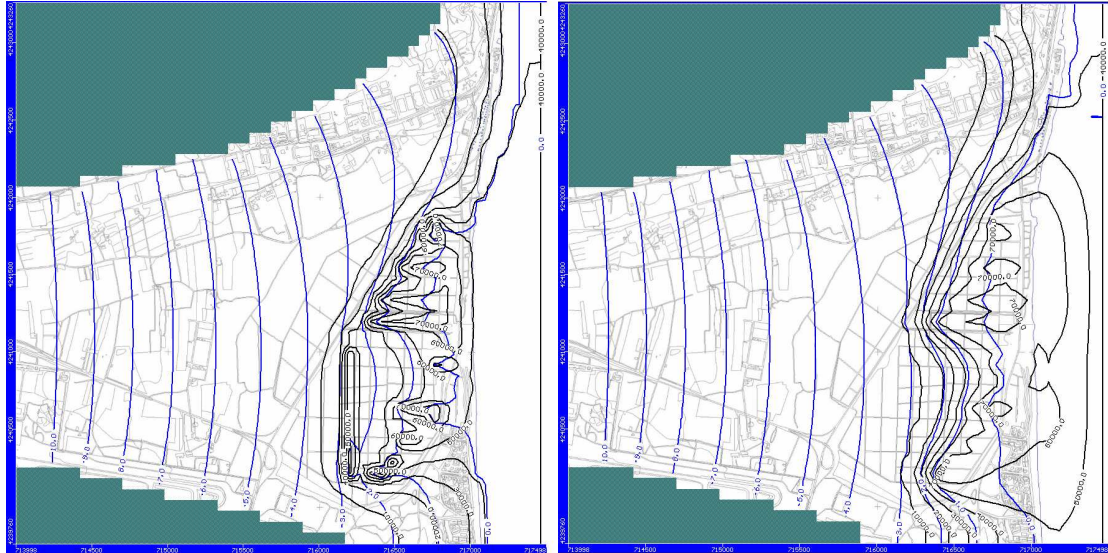


Figura 8.38. Distribución en planta de isolíneas en las capas 3 (izquierda) y 6 (derecha) del modelo

Las trayectorias de las partículas se muestran en las figuras 8.39 (dos trayectorias) y 8.40 (conjunto de trayectorias). Se observa que se mantiene cierta complejidad en el recorrido de las partículas merced al patrón de isolíneas de este escenario.

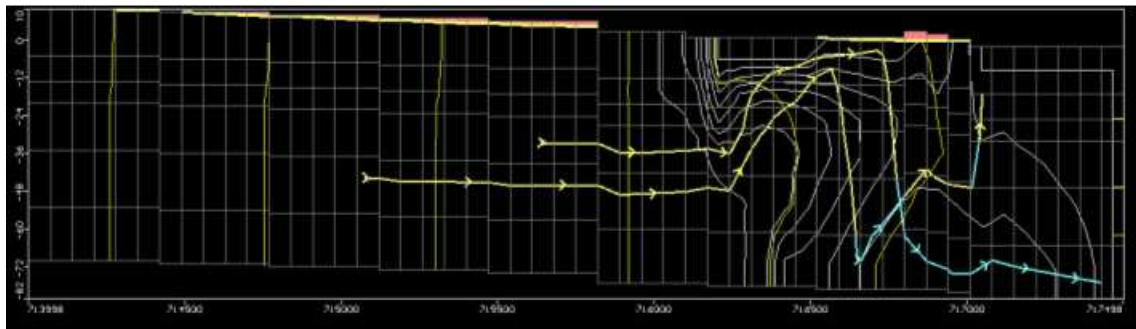


Figura 8.39. Trayectoria de dos partículas situadas inicialmente en la fila 36

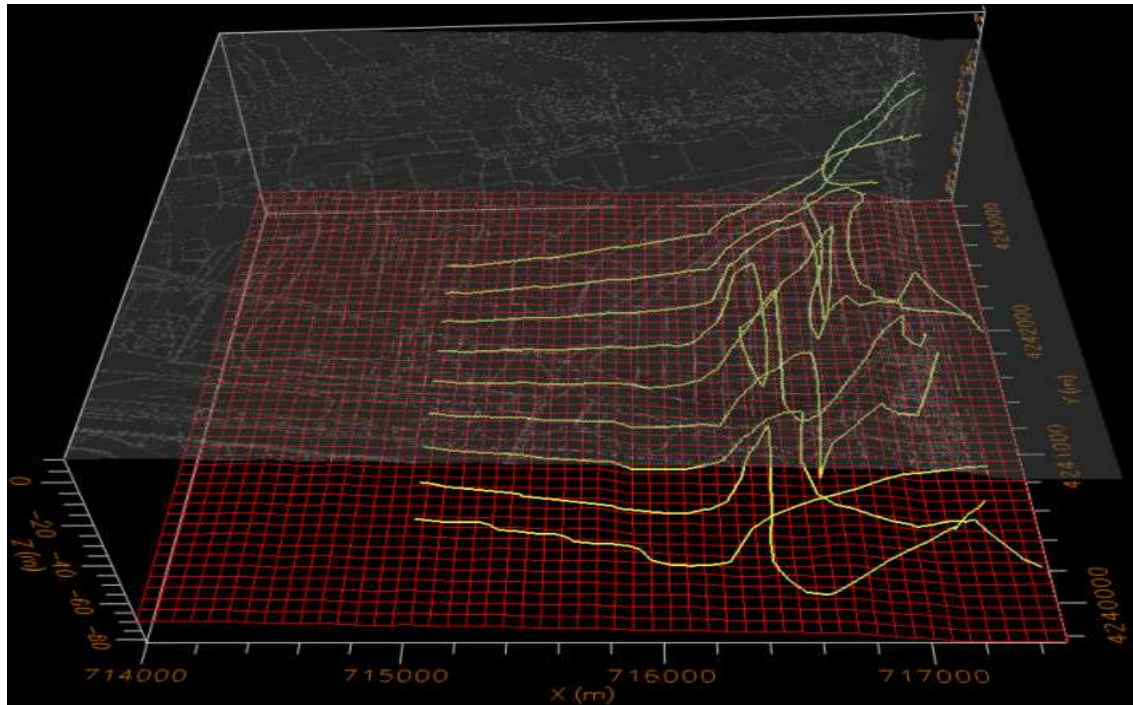


Figura 8.40. Conjunto típico de trayectorias del escenario 3

8.3.6 ESCENARIO 4: EXTRACCIONES DE LAS DESALADORAS

Las extracciones de la DA-I comienzan en septiembre de 2003 y cinco años más tarde las de la DA-II. Dado que los vertidos (escenario 5) coexisten con las extracciones, el periodo de simulación del escenario 4 se limita al momento de inicio de los vertidos, diciembre de 2009. La tabla 8.9 muestra la cronología de este escenario, que se ha separado en 3 periodos en función de los cambios en las condiciones de contorno (régimen de extracción). En la misma se recoge la fecha y duración de cada periodo. Los valores iniciales del modelo son los resultados estacionarios del escenario 3. Las condiciones de contorno aplicables son 1a, 1b, 2, 3, 6, 7a, 8, 9, 10, 11 y 13 (tabla 8.8).

Periodo	Fecha (año)	Intervalo de tiempo (días)	Acción	Volúmenes
1	sep-02/sep-03	0-365 (365)	Sin intervención antrópica	-
2	sep-03/sep-08	365-2190 (1825)	Explotación DA-I	45950 hm ³ /a 20981 m ³ /d (por pozo)
3	sep-08/dic-09	2190-2640 (450)	Explotación DA-I	45950 hm ³ /a 20981 m ³ /d (por pozo)
			Explotación DA-II	29208 hm ³ /a 3996 m ³ /d (por pozo)

Tabla 8.9. Cronología de los escenarios 4

Las figuras 8.41, 8.42 y 8.43 muestran las líneas isopiezas y la superficie piezométrica en distintos periodos de este escenario: meses antes del inicio de los bombeos (periodo 1),

inmediatamente antes de los bombeos de la DA-II (fin del periodo 2), e inmediatamente antes de los vertidos (fin del periodo 3), respectivamente. Comparando estos periodos cabe destacar, en primer lugar, que las extracciones han ocasionado una disminución de los niveles piezométricos por debajo del nivel del mar, tanto en la zona del saladar como en las inmediaciones de los pozos de extracción de la DA-I. Mientras que las extracciones de la DA-I causan descensos comprendidos entre 0,5 y 3,5 m en la zona del saladar y de 12 m junto a las captaciones (periodo 2), las de la DA-II causan descensos añadidos de 1,5 m en la zona del saladar (periodo 3). Por otro lado las captaciones modifican la distribución de isopiezas (aumento del gradiente hidráulico en torno a las mismas y emergencia de un eje de drenaje de dirección norte-sur bajo el saladar), atrayendo el flujo regional hacia los conos de extracción.

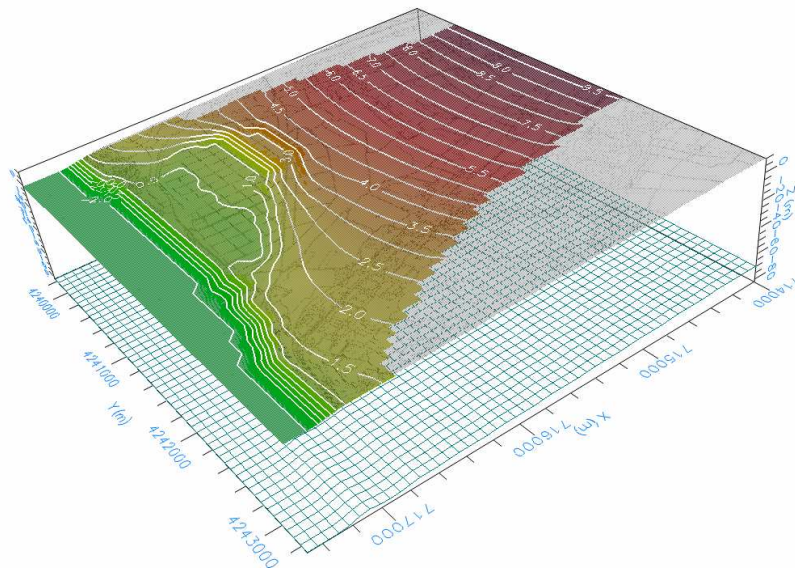


Figura 8.41. Superficie piezométrica e isopiezas del periodo 1 (antes de las extracciones)

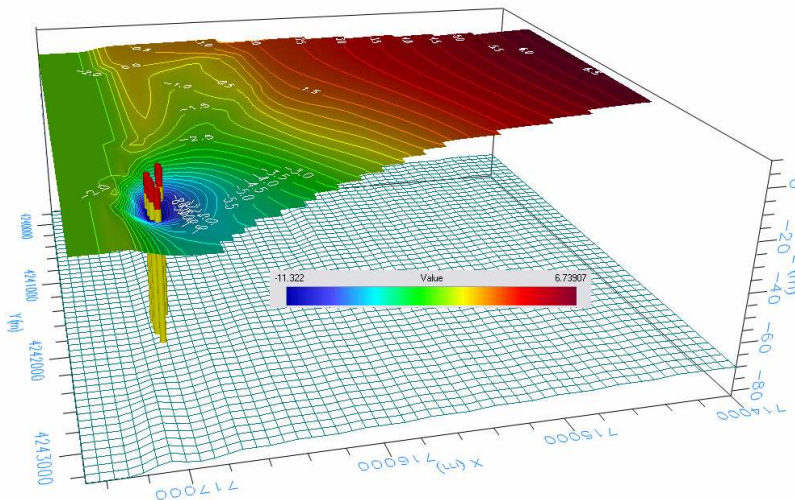


Figura 8.42. Superficie piezométrica e isopiezas del final del periodo 2

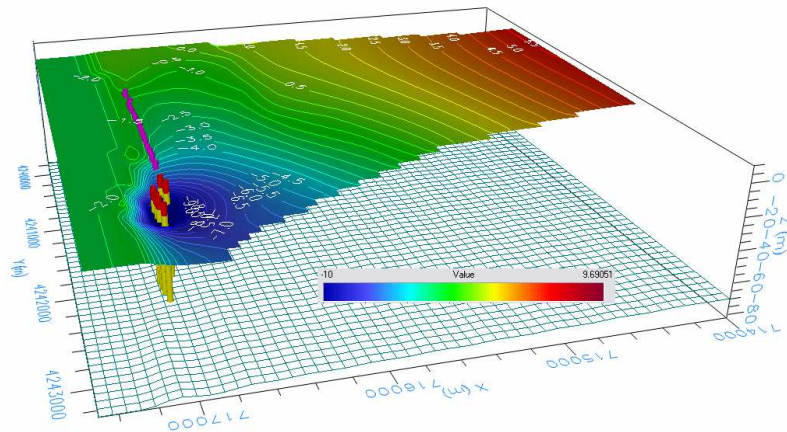


Figura 8.43. Superficie piezométrica e isopiezas del final del periodo 3

En relación con la concentración, las figuras 8.44, 8.45 y 8.46 muestran esta variable (hasta la isosuperficie de 10 g/l) para los tres periodos de este escenario. Cabe destacar el avance hacia el continente del pie del frente de intrusión en torno a 400 m debido a la puesta en marcha de las extracciones de la DA-I (periodo 2, figura 8.45), mientras que las extracciones de la DA-II apenas modifican la cuña de intrusión (periodo 3, figura 8.46). Para apreciar en detalle la influencia de los bombeos en la distribución de la salinidad del acuífero, las figuras 8.47 y 8.48 muestran las isosuperficies correspondientes a 10, 40 y 70 g/l en los periodos 1 y 3, respectivamente. En régimen de funcionamiento de ambas desaladoras, el avance del frente de intrusión se produce sobre todo en el sur, en la zona del saladar, mientras que en las inmediaciones de las captaciones de la DA-I se origina un retroceso del pie y una contaminación de las capas superiores, según muestra la isosuperficie de 10 g/l, y un retroceso de la isosuperficie de 40 g/l hacia el mar, quedando comprendida entre las captaciones y la línea de costa. Estos fenómenos se explican por la desviación de gran parte del flujo procedente del continente (flujo que controla el avance de la intrusión) hacia las captaciones.

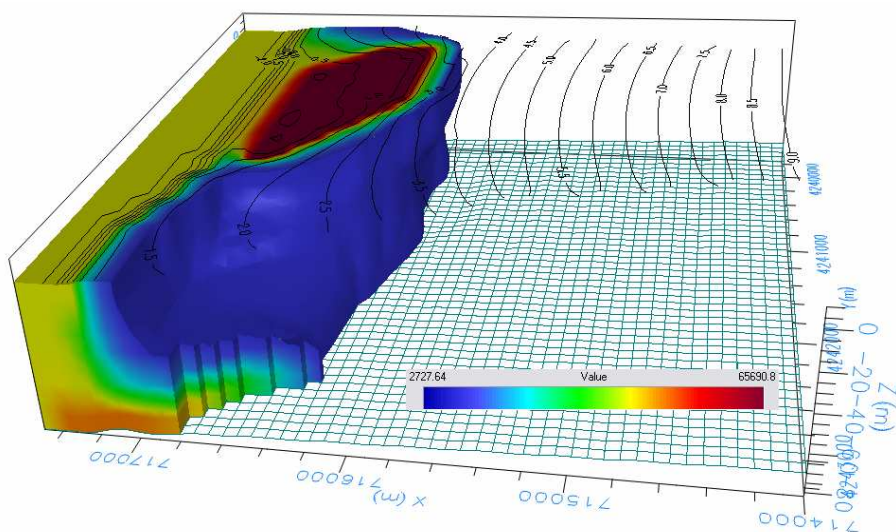


Figura 8.44. Superficie de isoconcentración de 10 g/l, periodo 1

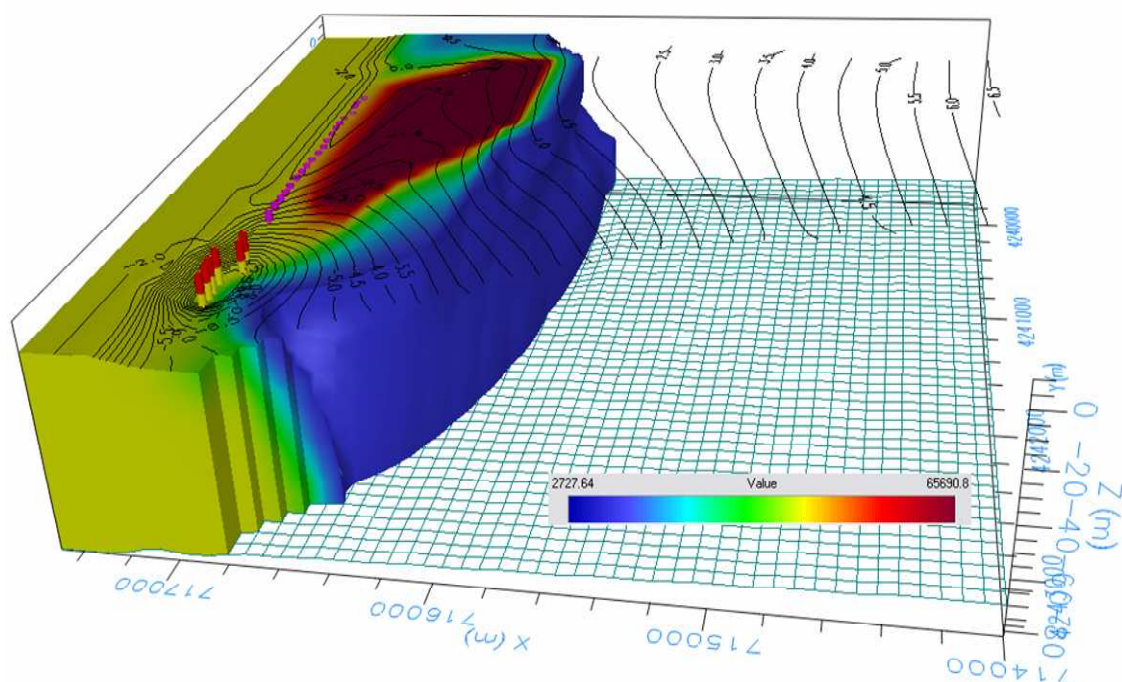


Figura 8.45. Superficie de isoconcentración de 10 g/l, final del periodo 2

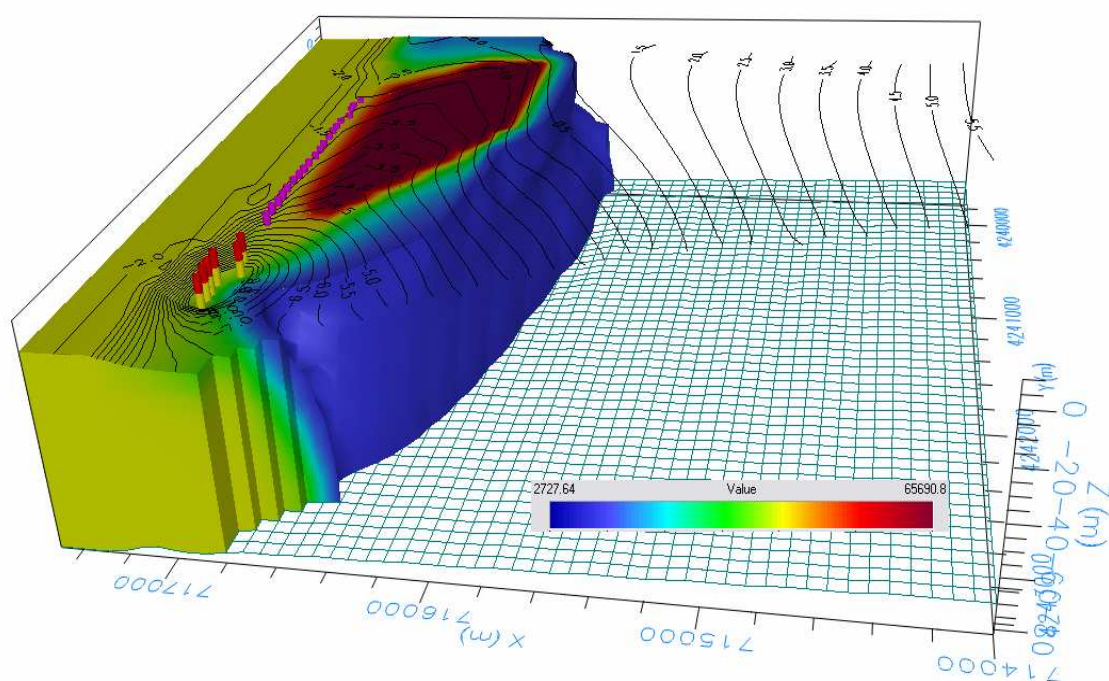


Figura 8.46. Superficie de isoconcentración de 10 g/l, final del periodo 3

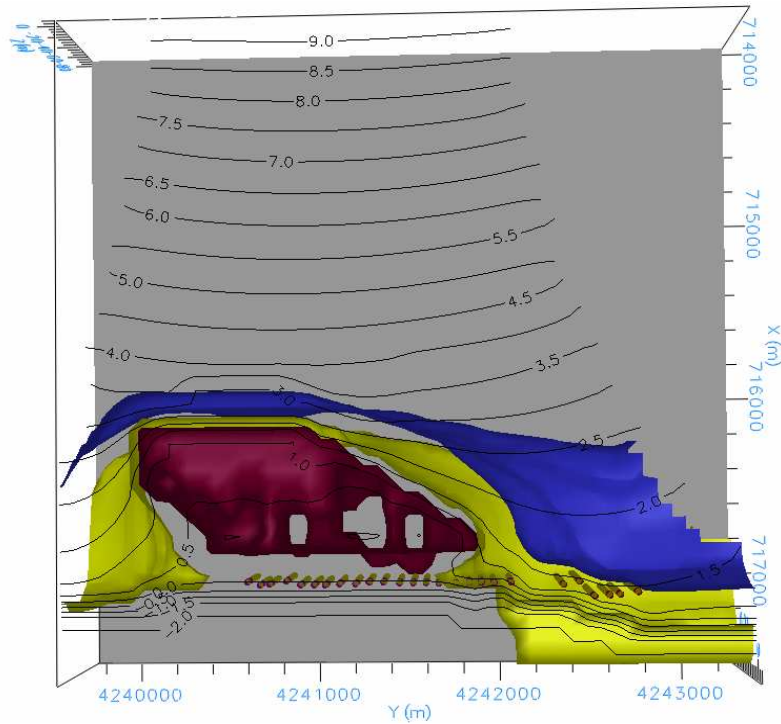


Figura 8.47. Superficies de isoconcentración 10 g/l (azul), 40 g/l (amarillo) y 70g/l (granate), periodo 1

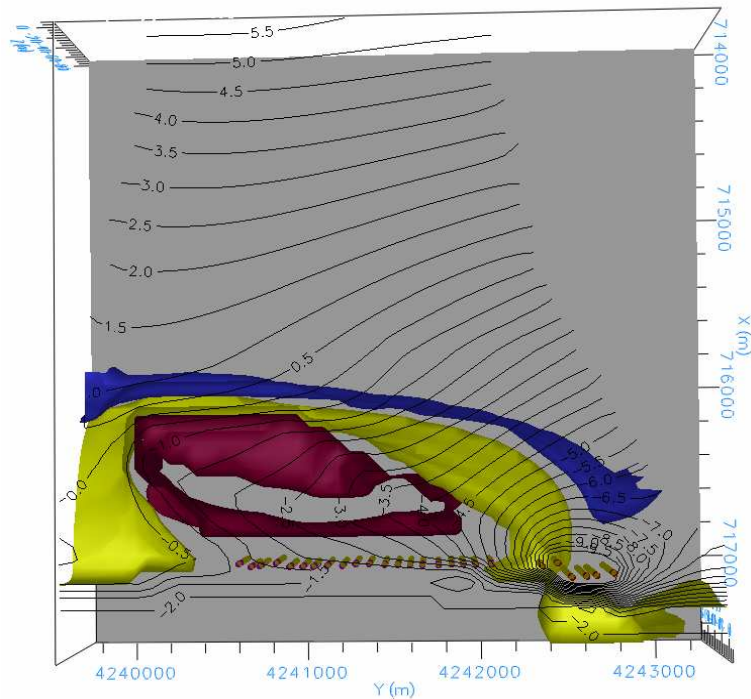


Figura 8.48. Superficies de isoconcentración 10 g/l (azul), 40 g/l (amarillo) y 70g/l (granate), final del periodo 3

Las figuras 8.49 y 8.50 muestran dos secciones verticales que recogen los pozos de captación, fila 13 y columna 23, respectivamente. Se aprecia que la calidad química de las aguas de la DA-I oscila en torno a la del agua de mar (40 g/l), entre 35 y 45 g/l, mientras que la de las captaciones de la DA-II varía entre 45 y 39 g/l, ligeramente por encima del agua de mar. Además se destaca la existencia de bolsas de agua salada en la base del acuífero.

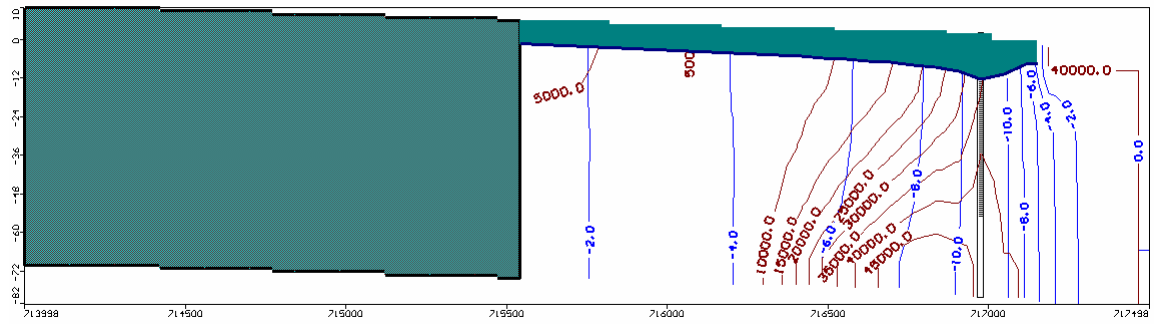
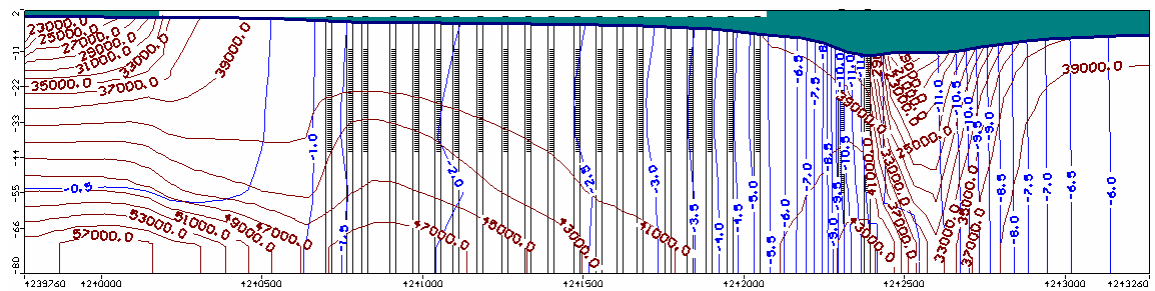


Figura 8.49. Isolíneas de concentración y piezometría en la fila 13 (que incluye a los pozos de la DA-I); final del periodo 3



Finalmente, la figuras 8.51 muestra la proyección en planta de las trayectoria de algunas partículas y un detalle de su recorrido en 3-D. Mientras que las trayectorias situadas al norte del saladar que dirigen hacia los pozos de la DA-I son regulares, las situadas más al sur realizan movimientos de recirculación en las cercanías del saladar antes seguir una trayectoria regular en su camino hacia los pozos. Así, queda de manifiesto el efecto pantalla que produce el saladar sobre la trayectoria de estas partículas.

8.3.7 ESCENARIO 5: VERTIDOS Y ESTADO ACTUAL

Los vertidos sobre el saladar, que comienzan en diciembre de 2009, coinciden con una reducción de las extracciones medias de la DA-II. Dichos vertidos finalizan en julio de 2010. La cronología de este escenario se ha dividido en dos periodos ilustrados en la tabla 8.10. Las condiciones de contorno son 1, 2, 3, 5, 6, 7b, 8, 9, 10, 12, 13 y 14 (tabla 8.8).

Periodo	Fecha (año)	Intervalo de tiempo (días)	Acción	Volúmenes
1	dic-09/jul-10	2640-2850 (210)	Explotación DA-I	45.950 hm ³ /a* 20981 m ³ /d (por pozo)
			Explotación DA-II	8.736 hm ³ /a 1196 m ³ /d (por pozo)
			Vertidos	0.737 hm ³ 3026 mm/a
2	jul-10/ene-11	2850-3030 (180)	Explotación DA-I	45.950 hm ³ /a* 20981 m ³ /d (por pozo)
			Explotación DA-II	8.736 hm ³ /a 1196 m ³ /d (por pozo)

Tabla 8.10. Cronología de los escenarios 5

En la figura 8.52 se muestran las líneas isopiezas y la superficie piezométrica del final del periodo 1. Respecto a la situación previa a los vertidos (periodo 3, escenario 4), se aprecia un aumento de los niveles piezométricos de entre 0,5 y 2,0 m bajo el saladar.

La distribución de concentraciones al final del periodo 1 (figura 8.53) muestra una descontaminación de las aguas más superficiales del saladar, merced al efecto de dilución que provoca el vertido. Tras el cese de los vertidos (periodo 2), se recupera lentamente la salinidad de las capas superiores bajo el saladar (figura 8.54). La situación final del periodo 2, correspondería con el momento actual (enero de 2011). Algunos de los piezómetros (como el D-2 y P-1), que han registrado descensos en la conductividad eléctrica durante los vertidos, como predice el periodo 1 del modelo, han mantenido valores próximos a la del mar al cesar los vertidos, en contra de lo que predice el periodo 2, lo que indica que quizá la condición de contorno 11 debería reconsiderarse. El estudio de la condición de contorno de concentración, aplicable en este periodo, requiere el seguimiento a más largo plazo de la evolución de la salinidad en estos piezómetros, tarea que podrá ser abordada en futuros estudios.

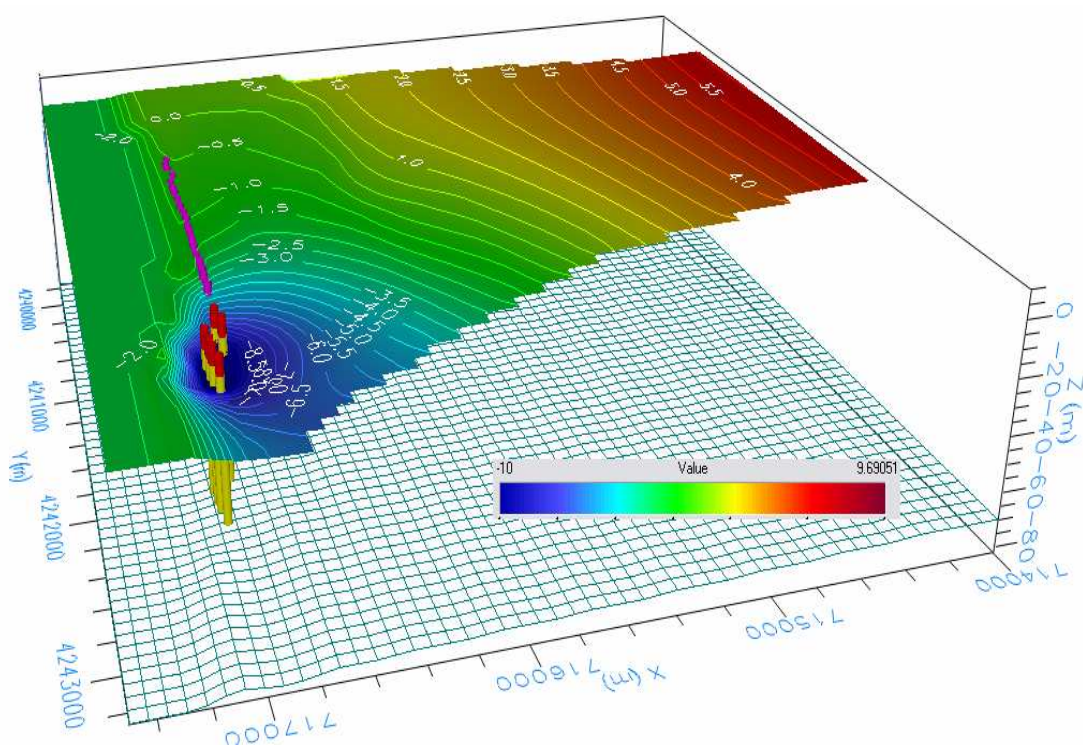


Figura 8.52. Superficie piezométrica e isopiezas al final de los vertidos (periodo 1, escenario 5)

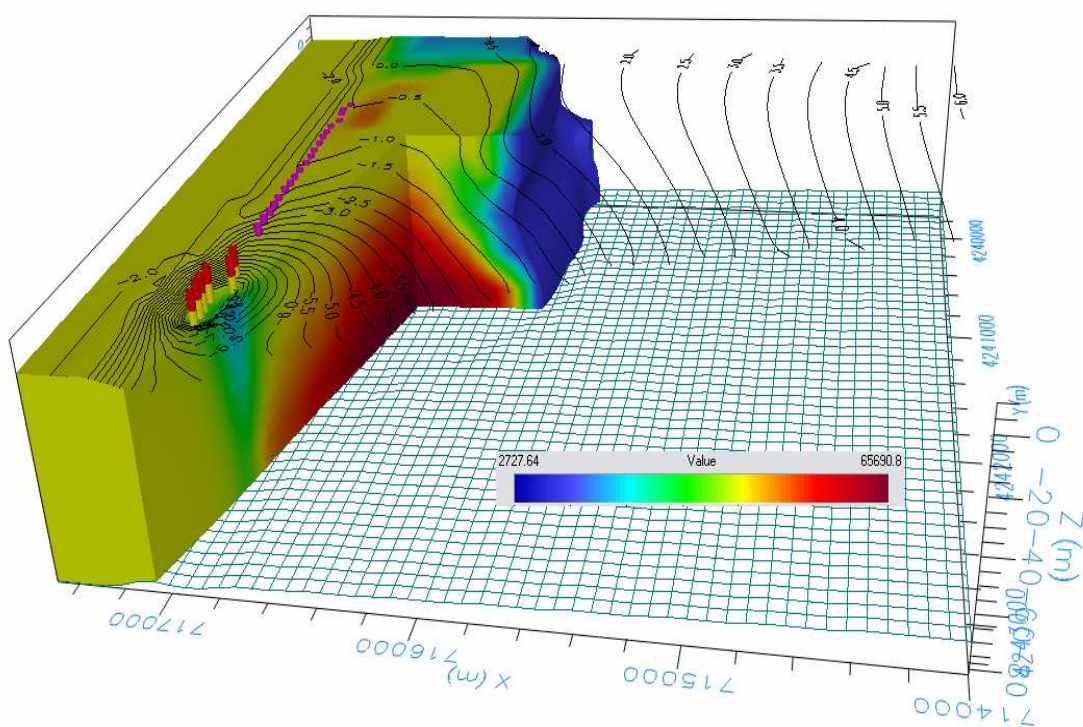


Figura 8.53. Superficie piezométrica e isopiezas durante los vertidos (periodo 1, escenario 5)

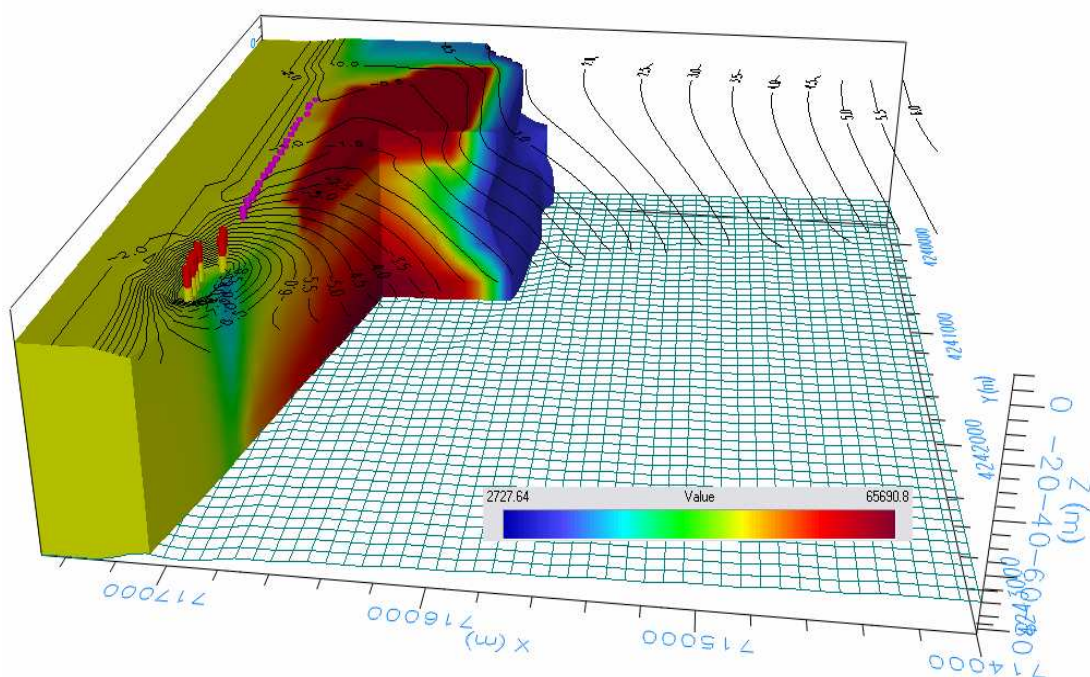


Figura 8.54. Superficie de isoconcentración de 10 g/l, final del periodo 2 (enero 2011)

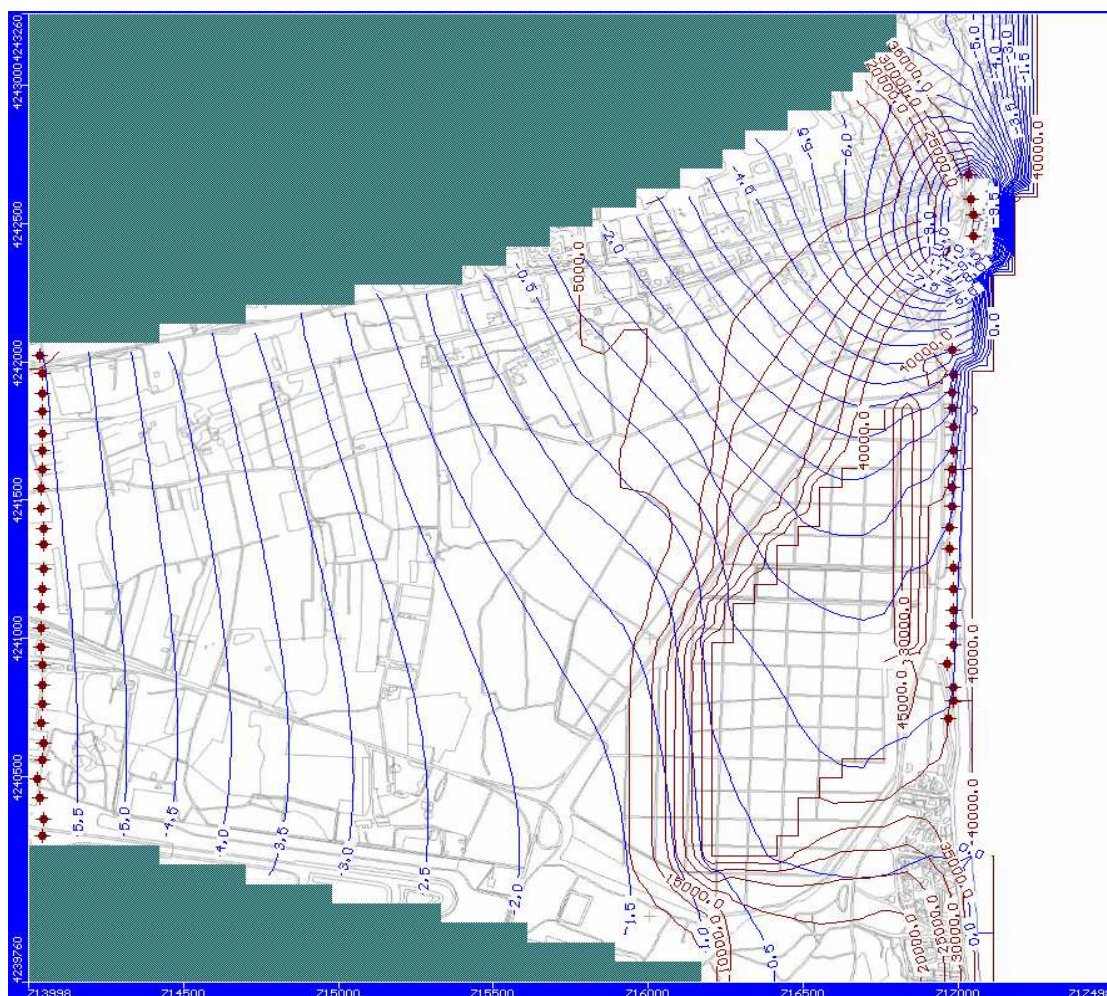


Figura 8.55. Isolíneas de concentración y piezometría del final del periodo 1, escenario 5

En la figura 8.55 se muestra la distribución en planta de isolíneas de concentración y de piezometría correspondiente al final del periodo 1. En cuanto a la piezometría, se aprecia que, pese a los vertidos, continúa el eje de drenaje bajo el saladar. La concentración en el saladar disminuye respecto a la situación sin vertidos (de 80 a 40 g/l), lo que puede apreciarse en la isolínea de 40 g/l, mientras que la isolínea de 10 g/l tiene una forma similar a la correspondiente al periodo 3 del escenario 4, que ya fue comentada. Estas observaciones también pueden apreciarse en la figura 8.56, isosuperficies de 10, 40 y 60 g/l. La distribución de las isolíneas de concentración y piezometría de la sección vertical correspondiente a la fila 36, al final del periodo 1, se ilustra en la figura 8.57, en la que puede apreciarse una disminución de los valores de concentración bajo el saladar. Esta variación se deriva también de la comparación de los escenarios 4 y 5; los vertidos causan la desaparición de la isosuperficie de 70 g/l (figura 8.48), relegando la zona más contaminada del acuífero al área situada bajo la isosuperficie de 60 g/l de la figura 8.57.

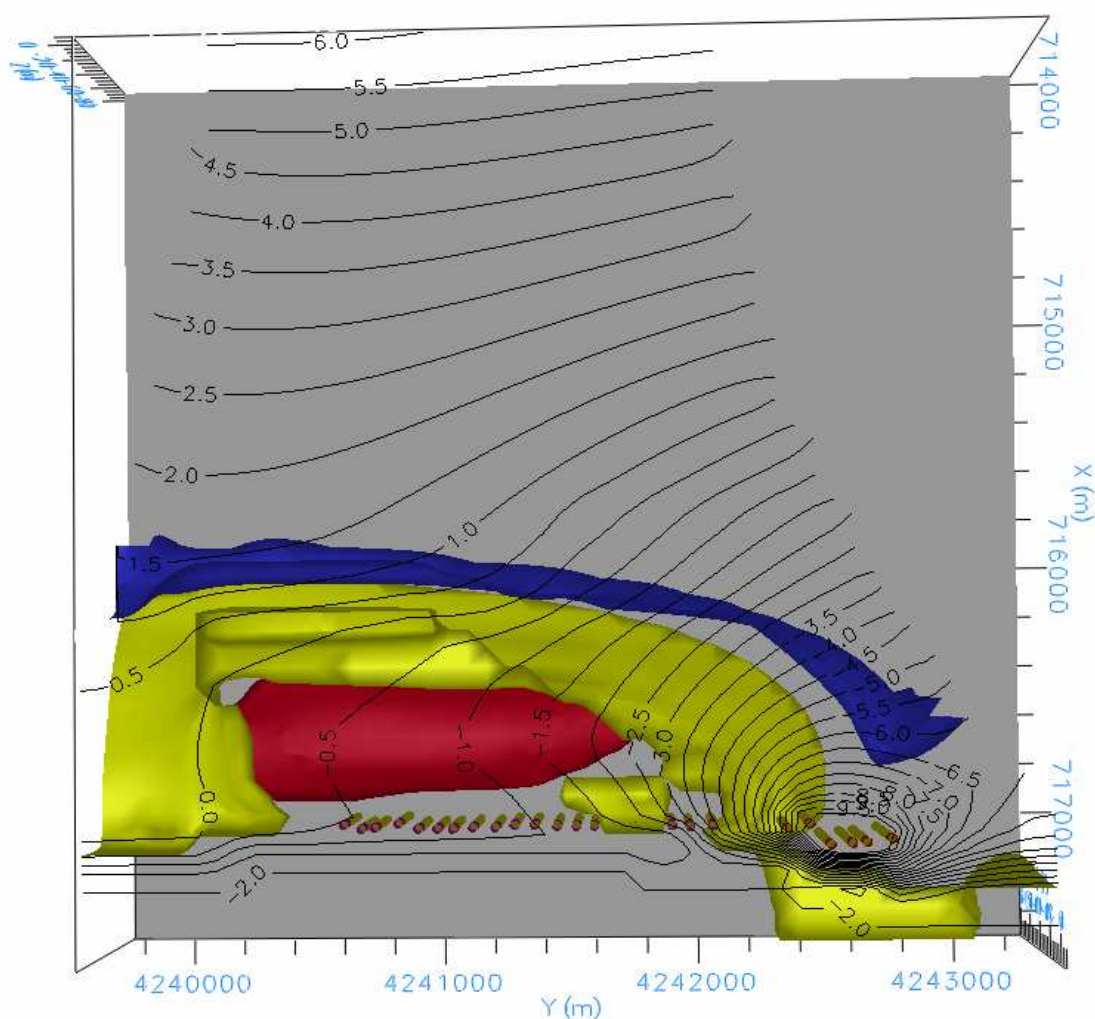


Figura 8.56. Superficies de isoconcentración 10 g/l (azul), 40 g/l (amarillo) y 60g/l (rojo) (final del periodo 2, escenario 5)

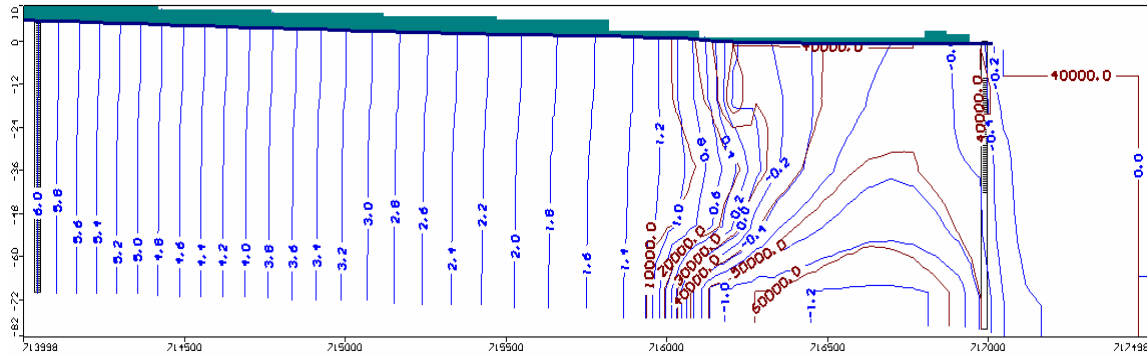


Figura 8.57. Isolíneas de concentración y piezometría de la sección vertical correspondiente a la fila 36 (final del periodo 2, escenario 5)

8.3.8 ESCENARIO 6: VERTIDOS SIN LA INFLUENCIA DEL SALADAR

Con la idea de simular el efecto sobre la salinidad que provocaría exclusivamente el vertido con agua de mar sobre la superficie de un acuífero costero sometido a régimen de explotación, se ha llevado a cabo una nueva simulación de los escenarios 3 y 4, excluyendo las condiciones de contorno ligadas al saladar.

La simulación se ha dividido en tres periodos; periodo 1 sin extracciones (régimen estacionario del escenario 3), periodo 2 con extracciones (final del periodo 3 del escenario 4) y periodo 3 con extracciones y vertidos (se deja evolucionar durante 10 años). En el periodo 3 se utilizan las condiciones 1a, 2, 3, 5, 6, 7a, 8, 9, 10, 12 y 13 de la tabla 8.8.

En las figuras 8.58, 8.59 y 8.60 se muestra la posición de la isosuperficie de 20 g/l correspondiente a los periodos 1, 2 y 3, respectivamente. Respecto a la evolución de la cuña de intrusión con el funcionamiento de las explotaciones, cabe realizar los mismos comentarios que se hicieron en los apartados anteriores. Por otra parte, se observa como los vertidos no producen una modificación apreciable de la cuña de intrusión, limitándose la salinización a las capas más superficiales del acuífero y al espacio comprendido entre los vertidos y las captaciones, lo cual se apoya también en la observación de la trayectoria de las partículas depositadas durante el periodo 3 sobre la superficie de vertidos (figura 8.61).

También se situaron dos piezómetros para el control de la concentración (figura 8.62), en los que se aprecia que la puesta en marcha de las desaladoras provoca una tendencia a la disminución de la salinidad que se ve interrumpida por el efecto transitorio de los vertidos, recuperándose esta tendencia 4 años después, tras recobrase el régimen de flujo estacionario.

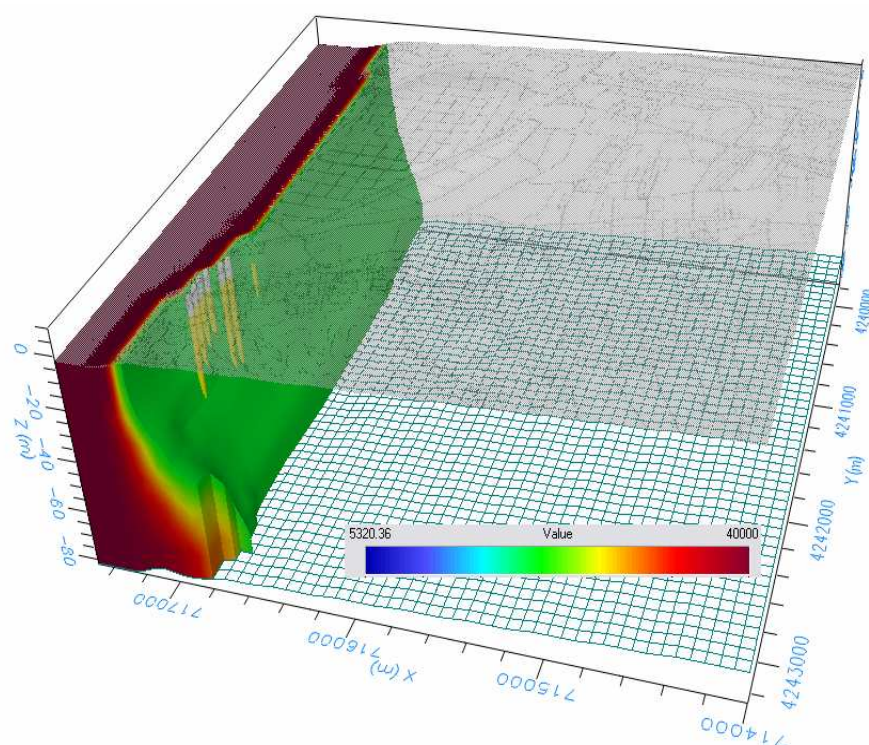


Figura 8.58. Superficie de isoconcentración de 20 g/l en estado estacionario (periodo 1, escenario 6)

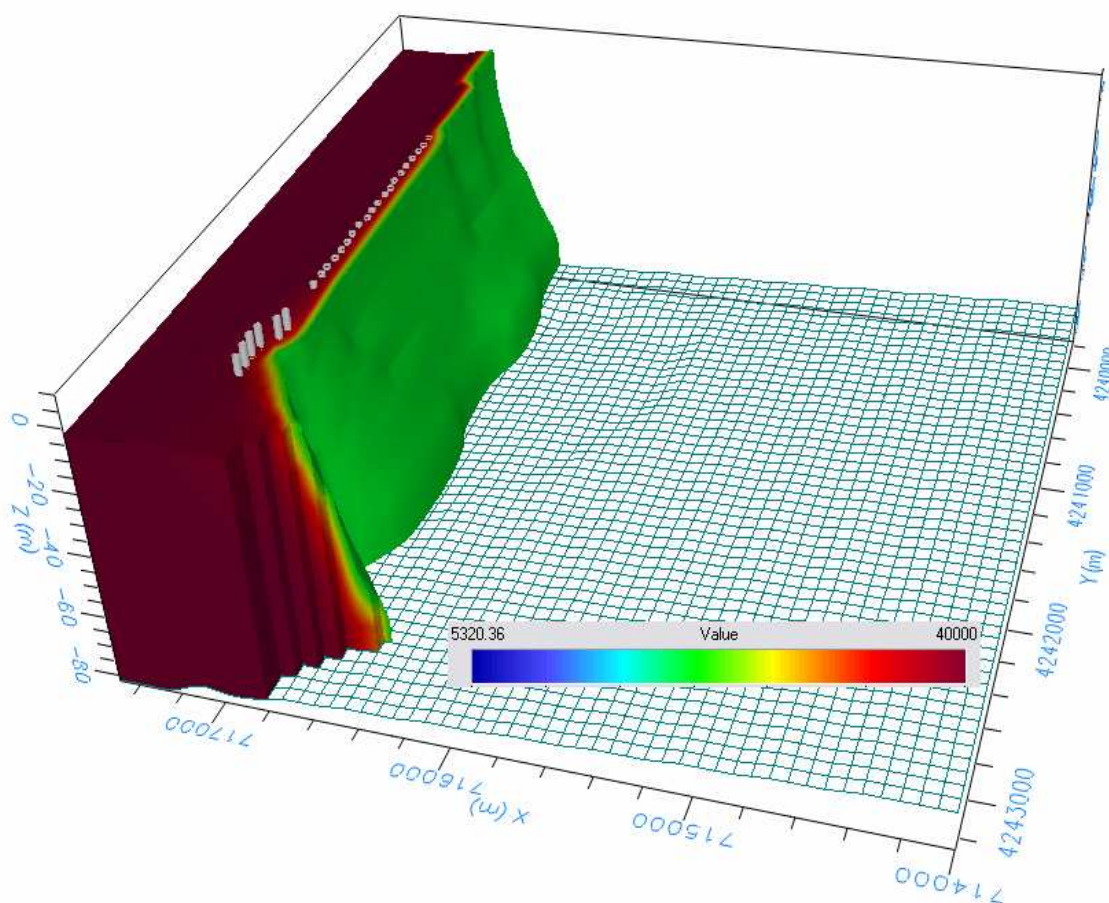


Figura 8.59. Superficie de isoconcentración de 20 g/l en estado estacionario (periodo 2, escenario 6)

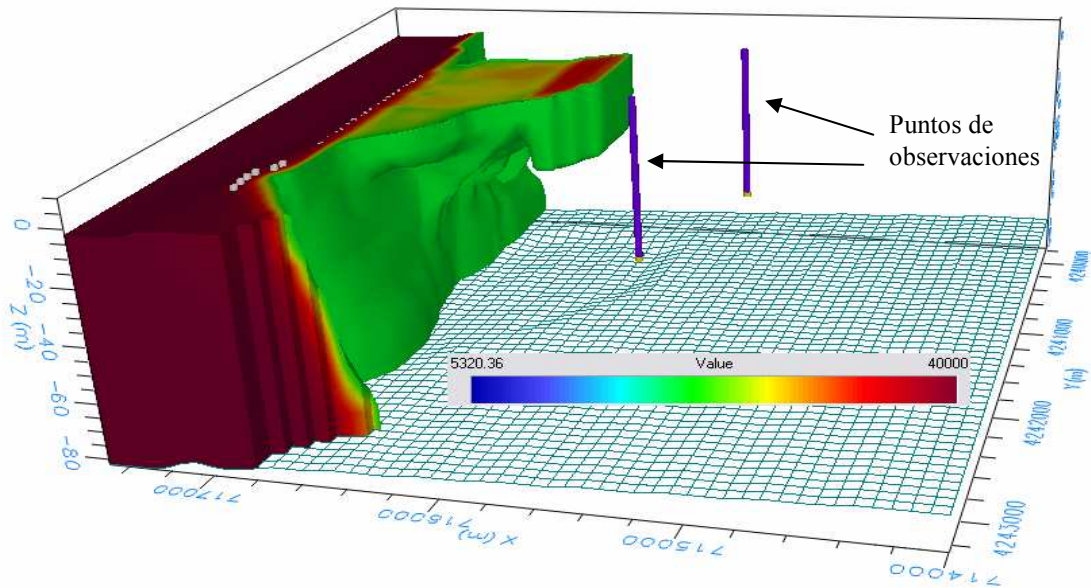


Figura 8.60. Superficie de isoconcentración de 20 g/l en estado estacionario (periodo 3, escenario 6)

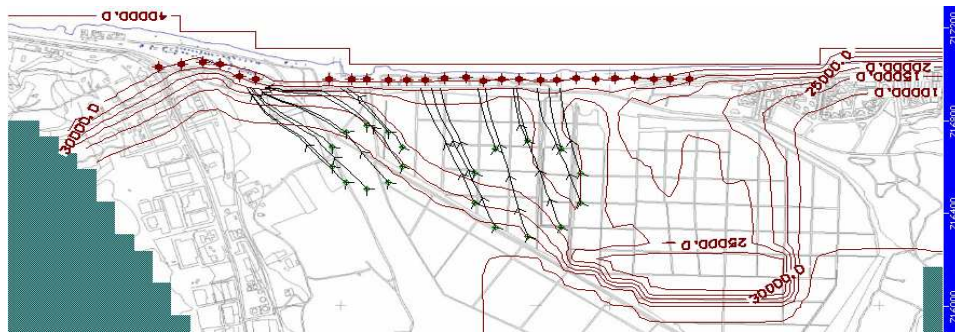


Figura 8.61. Partículas liberadas sobre la superficie de vertidos en el periodo 3 del escenario 6

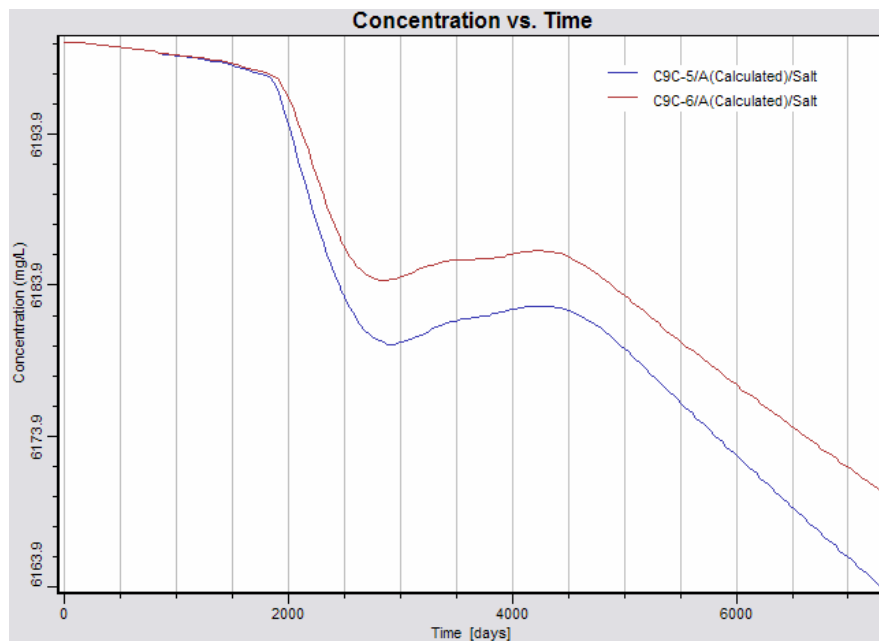


Figura 8.62. Evolución de la concentración en los puntos de observación de la figura 8.60

8.3.9. CALIBRACIÓN DEL MODELO Y COMENTARIOS FINALES

Asumiendo el alto grado de incertidumbre que existe en torno a los valores de algunos de los parámetros del escenario (geometría, valores de permeabilidad, entradas laterales, límites del acuífero, etc), se ha escogido, en primera instancia, el parámetro conductividad hidráulica para efectuar la calibración debido a que el rango de valores que presentan los materiales que constituyen el acuífero (tabla 7.1) se mueve entre los mayores órdenes de magnitud en relación con los rangos correspondientes a otros parámetros involucrados en el proceso. La calibración se ha realizado seleccionando los valores de conductividad hidráulica (dentro de los márgenes admisibles) que mejor ajustasen los registros piezométricos simulados a los registros reales, escogiéndolo para ello, piezómetros ubicados en diferentes zonas del acuífero y comparando distintos periodos de los escenario 4 y 5. Para cada capa, se procedió mediante un proceso iterativo de: ‘asignación de conductividad → simulación → lectura piezométrica → comparación con el valor de campo y nuevo ajuste de conductividad’. La figura 8.63 muestra los resultados finales de conductividades atribuidas a las diferentes capas del modelo (figura 8.25).

Conductivity						
	Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	Active	Distribution Array
	1	70	70	50	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2	100	100	70	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3	43	43	34	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4	0.8	0.8	0.6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 8.63. Valores de conductividad hidráulica de las capas del modelo (figura 8.25) tras la calibración

En primer lugar se han ajustado los piezómetros situados junto a las extracciones de la DA-I que no se ven afectados por los vertidos; a continuación, los situados en la línea de costa junto a las extracciones de la DA-II (antes de los vertidos) y, finalmente, tres piezómetros situados en el saladar, al sur y al oeste del mismo (durante los vertidos). El resultado final del ajuste de valores piezométricos se muestra en la tabla 8.11. La calibración se considera aceptable teniendo en cuenta los objetivos cualitativos del modelo.

Tiempo	Piezómetro	Localización	Intervalo medida (m s.n.m.)	Valor medio (m s.n.m.)	Valor simulado (m s.n.m.)
Ene-10/ene-11	DI-4	Junto extracciones DA-I	-11/-16	-14	-13
	DI-18		-10/-13	-13	-13
Antes de los vertidos	P-16, P-13, P-11, P-10 y P-9	Línea de costa, junto a extracciones de la DA-II	-1/-2,5	-	-0,5/-2,0
Durante vertidos	P-6	Sur del saladar	1	-	0,8
	P-4	Oeste del saladar	1	-	1,3
	P-1	Saladar	0	-	0,5

Tabla 8.11. Comparación entre valores piezométricos reales y simulados

Entre los aspectos para los que el modelo aporta información coherente con los registros de campo, cabe destacar lo siguiente:

- i) la piezometría obtenida en la simulación correspondiente al escenario 4 reproduce aceptablemente la elaborada a partir de los datos de campo; por ejemplo, la emergencia de un eje de drenaje de dirección norte-sur (figuras 8.45 y 8.46) bajo el saladar y la forma del cono de bombeo junto a las captaciones de la DA-I,
- ii) las observaciones realizadas en los registros de conductividad de la DA-I (figura 7.27 y 7.28) y de la DA-II (figura 7.31) son coherentes con las observaciones realizadas en el escenario 4 (figuras 8.49 y 8.50),
- iii) la dilución de las aguas en las capas más superficiales del acuífero por el efecto de los vertidos, de la que se tiene constancia en los registros de conductividad eléctrica de los piezómetros de la línea de costa y del saladar (Anexo 6 y Capítulo 7), se reproduce en el periodo 1 del escenario 5 (figura 8.53),
- iv) el hecho de que la piezometría varíe con la profundidad, como se explicó en el capítulo 7 (tabla 7.3) también se reproduce en cualquiera de los escenarios del modelo, como se muestra en la sección vertical representada en la figura 8.64.

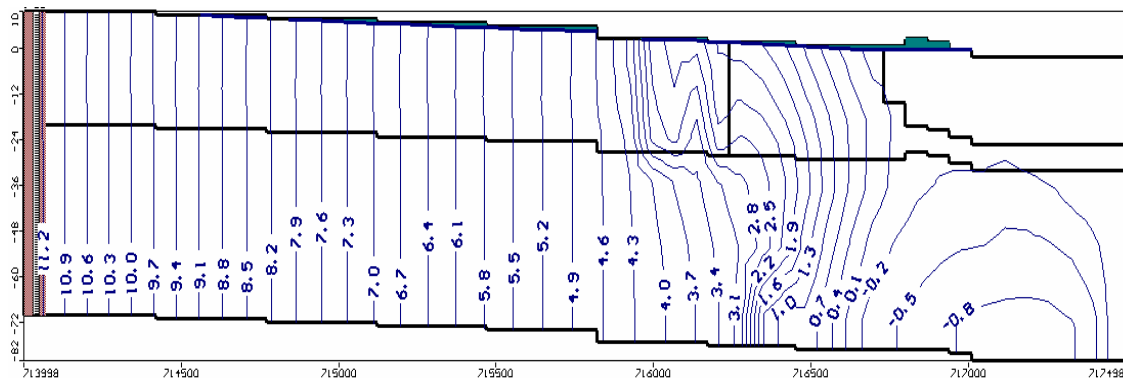


Figura 8.64. Distribución de isopiezías en una sección vertical correspondiente a la fila 40, escenario 4

Finalmente se ha realizado un balance hídrico al final del periodo 3 del escenario 4 y al final del periodo 2 del escenario 5. Para ello el acuífero se ha dividido en tres zonas que se ilustran en la figura 8.65. Los resultados se sintetizan en la tabla 8.12 y en la figura 8.66. De acuerdo con el balance, el flujo neto que entra en la zona 1 procedente de la 2 (el mar) supone un 89,7 % (valor muy próximo 88,2%, calculado en el balance del Capítulo 7) en el escenario 4, y un 85,3 % en el escenario 5. Las variaciones de los términos del balance entre ambos escenarios se explican por la disminución en el régimen de extracción de la DA-II y por el efecto de la recarga con vertidos.

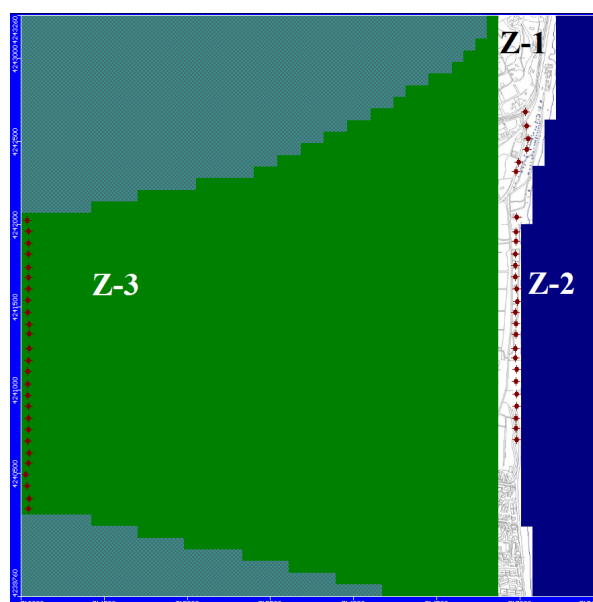


Figura 8.65. Subdivisión del acuífero en zonas para la realización del balance

	Escenario 4 (m ³ /d)	Escenario 5 (m ³ /d)
Z-1 a Z-2	246,1	243,6
Z-2 a Z-1	182340,0	126420,0
Z-1 a Z-3	18270,0	18858,0
Z-3 a Z-1	40099,0	40690,0

Tabla 8.12. Caudales de trasvase entre zonas del balance

Inflow	Outflow	Inflow	Outflow
Storage = 40.89 m ³ /day Constant Head = 0.00 m ³ /day Wells = 0.00 m ³ /day Drains = 0.00 m ³ /day DCDT = 4.64 m ³ /day Recharge = 117.60 m ³ /day ET = 0.00 m ³ /day River Leakage = 0.00 m ³ /day Stream Leakage = 0.00 m ³ /day Surface Leakage = 0.00 m ³ /day General-Head = 0.00 m ³ /day Zone 2 to 1 = 182340.00 m ³ /day Zone 3 to 1 = 40099.00 m ³ /day Total IN = 222610.00 m ³ /day	Storage = 27.33 m ³ /day Constant Head = 0.00 m ³ /day Wells = 204060.00 m ³ /day Drains = 0.00 m ³ /day DCDT = 2.31 m ³ /day Recharge = 0.00 m ³ /day ET = 0.00 m ³ /day River Leakage = 0.00 m ³ /day Stream Leakage = 0.00 m ³ /day Surface Leakage = 0.00 m ³ /day General-Head = 0.00 m ³ /day Zone 1 to 2 = 246.14 m ³ /day Zone 1 to 3 = 18270.00 m ³ /day Total OUT = 222610.00 m ³ /day	Storage = 0.00 m ³ /day Constant Head = 0.00 m ³ /day Wells = 0.00 m ³ /day Drains = 0.00 m ³ /day DCDT = 4.52 m ³ /day Recharge = 117.60 m ³ /day ET = 0.00 m ³ /day River Leakage = 0.00 m ³ /day Stream Leakage = 0.00 m ³ /day Surface Leakage = 0.00 m ³ /day General-Head = 0.00 m ³ /day Zone 2 to 1 = 126420.00 m ³ /day Zone 3 to 1 = 40690.00 m ³ /day Total IN = 167230.00 m ³ /day	Storage = 57.21 m ³ /day Constant Head = 0.00 m ³ /day Wells = 148060.00 m ³ /day Drains = 0.00 m ³ /day DCDT = 0.43 m ³ /day Recharge = 0.00 m ³ /day ET = 0.00 m ³ /day River Leakage = 0.00 m ³ /day Stream Leakage = 0.00 m ³ /day Surface Leakage = 0.00 m ³ /day General-Head = 0.00 m ³ /day Zone 1 to 2 = 243.62 m ³ /day Zone 1 to 3 = 18858.00 m ³ /day Total OUT = 167220.00 m ³ /day
Zone1		Zone1	
Difference IN - OUT = -2.4069 m ³ /day Percent Discrepancy = 0%		Difference IN - OUT = 5.6197 m ³ /day Percent Discrepancy = 0%	

Figura 8.66. Resultado del balance en el periodo 3 del escenario 4 (izquierda) y en el periodo 1 del escenario 5 (derecha)

CAPÍTULO 9

INCIDENCIA DE LAS EXPLOTACIONES DE LAS DESALADORAS DA-I Y DA-II EN EL HUMEDAL DEL SALADAR DE AGUA AMARGA Y MEDIDAS CORRECTORAS

CAPÍTULO 9

9. INCIDENCIA DE LAS EXPLOTACIONES DE LAS DESALADORAS DA-I Y DA-II EN EL HUMEDAL DEL SALADAR DE AGUA AMARGA Y MEDIDAS CORRECTORAS

9.1. INTRODUCCIÓN. EL HUMEDAL DEL SALADAR DE AGUA AMARGA

El importante papel que juegan los humedales en el conjunto de la biosfera ha sido estudiado por muchos investigadores en los últimos años, Mitsch (1994), Maltby et al. (1996), Farina (2000), Levin (2007), Jorgensen y Fath (2008), Mitsch et al. (2009) y Vymazal (2010). Su estudio requiere un planteamiento multidisciplinar que pone de relieve sus diferentes valores ecológicos (Amezaga et al., 2002; Zedler y Kercher, 2005), económicos (Gren, 1995; Mitsch, 2000; Turner et al., 2000; Chen et al., 2009), sociales (MEA, 2005) e hidrogeológicos (Coats et al., 1989; Kazezyelmaz-Alhan y Medina, 2008; Maltby, 2009). Estos diferentes enfoques han sido tratados en las ocho ediciones de los Congresos Internacionales de Humedales Intecol, que el Wetland Working Group (WWG) ha celebrado desde 1980.

Los organismos de gestión de recursos hídricos han ido tomando conciencia, progresivamente, de la necesidad de la restauración de humedales dañados, convirtiendo ésta en uno de sus objetivos prioritarios. La restauración de humedales ha sido también estudiada por diferentes autores. Así, Zedler (1996) aborda los humedales costeros en el sur de California, Whigham (1999) estudia aspectos ecológicos relacionados con la restauración y valoración de humedales, Kentula (2000) propone criterios para el éxito de la restauración y, finalmente, Richardson et al. (2010) tratan la mejora de la calidad del agua en estos escenarios. Dichos estudios ponen de relieve la dependencia de estos ecosistemas de la presencia de agua, convirtiéndolos en sistemas sensibles a las alteraciones en el régimen hídrico del medio físico en el que se encuentran emplazados. Además de la presencia de agua, la vegetación juega un papel prioritario y condicionante, Gopal y Mitsch (1995), para el posterior emplazamiento de la fauna, Gawlik (2006) y Hickman et al. (1994).

Los humedales costeros presentan características peculiares en cuanto a que el mantenimiento de sus ecosistemas depende de la concentración salina en agua y suelo. La restauración de este tipo de humedales presenta por tanto un tratamiento específico, Zedler et

al. (1996 y 2000), Broome et al. (1988), Corlay (1993), Mitsch y Wang (2000) y Simenstad et al. (2006).

La caracterización de los ecosistemas formados en los humedales salobres del sureste español, entre los que se encuentra el saladar de Agua Amarga, ha sido estudiada por diversos autores: Alcaraz et al. (1989) en relación con la flora, Álvarez Rogel et al. (2000, 2001 y 2007) que estudian la interacción suelo-vegetación en ambientes influenciados por la salinidad y Jutglar y Masó (1999) en relación con el estudio de las aves que habitan estos ecosistemas. Como veremos más adelante, el saladar de Agua Amarga reúne una serie de valores biológicos que justifican la conservación de su entorno.

El parque natural municipal del Saladar de Agua Amarga es una albufera que se localiza en la costa del sureste de España, 1 km al norte de la población de El Altet. Este paraje está incluido en el Catálogo de Zonas Húmedas de la Comunidad Valenciana. Durante el periodo 1925-1975 fue utilizado como explotación salinera, evolucionando posteriormente de forma natural como zona húmeda expuesta a las invasiones esporádicas del mar durante temporales y a periodos de encharcamiento-desección, en función de los ciclos de lluvias y sequía estacionales. En su superficie se han desarrollado comunidades vegetales singulares propias de saladar, entre las que se encuentran hábitats de interés comunitario prioritario como las estepas salinas mediterráneas -*Limonietalia*- y especies de especial relevancia como los endemismos exclusivos *Limonium furfuraceum*, *Limonium parvibracteatum* y *Limonium santapolense* (foto 9.1a-c). También es área de campeo o alimentación de avifauna de lagunas próximas situadas más al sur (Clot Galvan, Santa Pola y el Hondo de Elche).

En septiembre del 2003, para satisfacer la demanda de agua dulce de Alicante y de Elche, la MCT puso en marcha la desaladora DA-I, mientras que en el año 2007 se construye la desaladora DA-II, ampliación de la anterior. Para evitar el impacto visual de nuevos pozos de abastecimiento sobre el ecosistema superficial del saladar, se llevó a cabo la construcción de un túnel (Capítulo 6) que actuaría como dren del acuífero para la captación del agua subterránea. Por otro lado, para atenuar el impacto sobre los niveles piezométricos en el saladar, se decidió que parte de la demanda fuera cubierta mediante 8 pozos horizontales dirigidos situados bajo el lecho marino (foto 6.5).

La explotación del acuífero costero de Agua Amarga para el abastecimiento de las desaladoras DA-I y DA-II planteó la necesidad de ejercer un control sobre la evolución espacio temporal de su piezometría y conductividad, ya que el equilibrio del ecosistema superficial está ligado a la dinámica de dicho acuífero. Para el referido control, entre septiembre de 2007 y enero de 2011, se instaló una red de control piezométrico y de calidad química sobre la superficie del saladar y proximidades (Capítulo 7). Desde mayo de 2008 la

UPCT, por encargo de la MCT, viene realizando un seguimiento mensual de piezometría y calidad química del acuífero ligado al saladar.

Tras la constatación, durante el tiempo de observación, de la alteración del régimen hidrodinámico del acuífero, la MCT llevó a cabo un estudio sobre medidas compensatorias y correctoras para la conservación de la zona húmeda. Entre todas ellas, se eligió una basada en criterios hidrogeológicos, consistente en el diseño de una red de riego en torno al saladar y en el desarrollo de un programa de vertidos con agua de mar distribuido en el espacio y el tiempo. En diciembre de 2009 se llevaron a cabo las primeras pruebas con resultado satisfactorio. La recuperación de los niveles hoy día es un hecho constatado. En adelante, la coordinación entre el control piezométrico y el programa de riegos tendrá como objetivo compensar los déficit de volúmenes, causados por las extracciones, que la recarga natural no pueda conseguir. El estudio de la recuperación de los hábitats que se lleva a cabo desde el verano de 2010 y su valoración en el futuro (MCT-UPCT, 2010c) servirá para la evaluación final del éxito del plan de restauración.

9.2. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL SALADAR DE AGUA AMARGA

La distribución espacial o zonación de las especies en el Saladar está condicionada principalmente por factores de tipo físico-químico (periodicidad de las inundaciones, presión osmótica de la solución del suelo, naturaleza química de las especies iónicas disueltas en el agua, profundidad del nivel freático) y biológicos (competencia interespecífica), Sánchez et al. (1996). La serie de vegetación dominante en el entorno de los saladares es la *Chamaeropo-Rhamneto Lyciodis* S, Rivas-Martínez (1987). Los organismos se encuentran especialmente adaptados a condiciones particulares con existencia de sal en suelos y/o presencia más o menos permanente de agua salada. Las especies detectadas, ordenadas según taxones, de interés relevante relacionadas con el Saladar de Agua Amarga y su área de influencia, se relacionan en la tabla 9.1. Las fotos 9.1 y 9.2, recogidas en el informe MCT-UPCT (2010c) muestran algunas de estas especies.

La conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres, dentro del territorio de la UE, quedó recogida en la Directiva 97/62/CEE, adoptada por el Consejo de las Comunidades Europeas en 1.997. En esta Directiva, se consideran hábitats naturales de interés comunitario los que se encuentran amenazados de desaparición en su área de distribución natural, los que presentan un área de distribución natural reducida a causa de su regresión o debido a su área intrínsecamente restringida, y los que constituyen ejemplos representativos de características de una o varias de las cinco zonas siguientes: alpina, atlántica, continental, macaronésica y mediterránea. Siguiendo dicha Directiva, en la zona de estudio y relacionados

con el saladar se han detectado cinco hábitats (de tipo costero y de vegetación halofítica) de interés comunitario que se resumen en la tabla 9.2.

Aizoaceae	Compositae	Solanaceae
* <i>Aizoon hispanicus</i>	* <i>Filago mareotica</i>	* <i>Lycium intricatum</i>
* <i>Mesembryanthemum nodiflorum</i>	* <i>Inula crithmoides</i>	Tamaricaceae
* <i>Mesembryanthemum crystallinum</i>	* <i>Senecio auricula</i>	* <i>Tamarix boveana</i>
Balanophoraceae	Frankeniaceae	* <i>Tamarix canariensis</i>
* <i>Cynomorium coccineum</i>	* <i>Frankenia corymbosa</i>	Thymelaceae
Chenopodiaceae	* <i>Frankenia pulverulenta</i>	* <i>Thymelaea hirsuta</i>
* <i>Arthrocnemum macrostachyum</i> (foto 9.2 a y d)	Orobanchaceae	Cyperaceae
* <i>Atriplex halimus</i> (foto 9.2 b)	* <i>Cistanche lutea</i>	* <i>Schoenus nigricans</i>
* <i>Atriplex glauca</i>	Plantaginaceae	Poaceae
* <i>Halimione portulacoides</i>	* <i>Plantago crassifolia</i>	* <i>Elymus elongatus</i>
* <i>Halogeton sativus</i>	Plumbaginaceae	* <i>Lygeum spartum</i>
* <i>Salicornia patula</i>	* <i>Limonium angustebracteatum</i>	* <i>Phragmites australis</i>
* <i>Salsola oppositifolia</i>	* <i>Limonium caesium</i>	Juncaceae
* <i>Salsola vermiculata</i>	* <i>Limonium cossonianum</i>	* <i>Juncus acutus</i>
* <i>Sarcocornia fruticosa</i> (foto 9.2 c)	* <i>Limonium delicatulum</i>	* <i>Juncus maritimus</i>
* <i>Suaeda vera</i> (foto 9.2 d)	* <i>Limonium furfuraceum</i>	Zannichelliaceae
* <i>Suaeda spicata</i>	* <i>Limonium parvibracteatum</i>	* <i>Althenia orientalis</i>
* <i>Suaeda pruinosa</i>	* <i>Limonium santapolense</i>	

Tabla 9.1. Especies de interés relevante relacionadas con el Saladar de Agua Amarga y su zona de influencia (* denota especie)

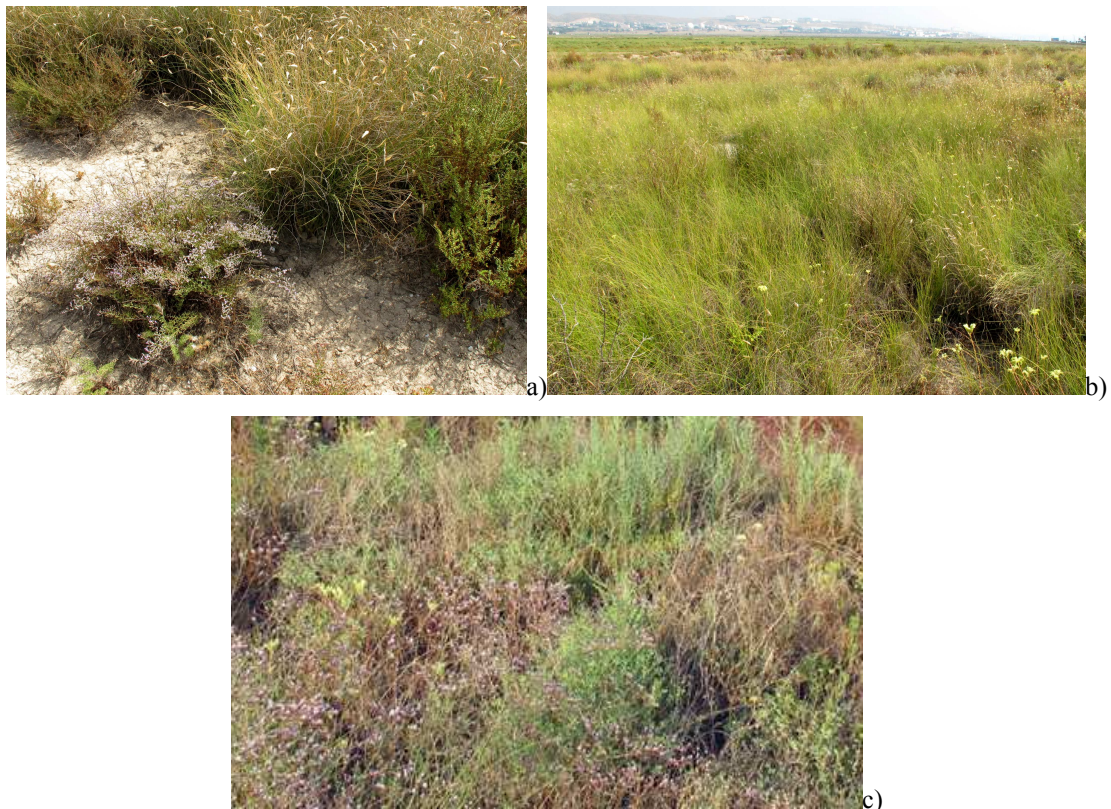


Foto 9.1. *Limonium furfuraceum* (a), albardinales con *Limonium* spp (b) y Tomillares de *Limonium cossonianum* y *L. santapolense* (c)



Foto 9.2. Almarjales de *Arthrocnemum macrostachyum* (a), ejemplar seco de *Atriplex halimus* en una zona típica de almarjal (b), *Sarcocornia* junto a línea de costa (c), *Suaeda vera* y *Arthrocnemum macrostachyum* (ejemplar color verde) (d)

Grupo	Hábitat	Ejemplos de comunidades
13. Marismas y pastizales salinos atlánticos y continentales	1310. Vegetación anual pionera con <i>Salicornia</i> y otras especies de zonas fangosas o arenosas.	<i>Salicornia</i> spp
14. Marismas y pastizales salinos mediterráneos y termoatlánticos	1410. Pastizales salinos mediterráneos (<i>Juncetalia maritimi</i>)	<i>Juncetalia maritimi</i> . Juncales halófilos
	1420. Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocornetea fruticosi</i>)	<i>Salicornia</i> , <i>Limonium</i> , <i>Suaeda</i> y <i>Atriplex</i>
	1430. Matorrales halo-nitrófilos (<i>Pegano-Salsolatea</i>)	
15. Estepas continentales halófilas y gipsófilas	1510. Estepas salinas mediterráneas (<i>Limonietalia</i>)	<i>Limonium</i> spp. o <i>Lygeum spartum</i> <i>Limonietalia</i> , <i>Arthrocnemetalia</i> , <i>Thero-Salicornietalia</i> y <i>Saginetalia maritimae</i>

Tabla 9.2. Hábitats de interés comunitario relacionados con el Saladar de Agua Amarga

La Directiva también contempla los hábitats naturales prioritarios, que son aquellos que se encuentran amenazados de desaparición y cuya conservación supone una especial responsabilidad para la UE. Las asociaciones vegetales cuyo mantenimiento es prioritario en el Saladar de Agua Amarga, por tratarse de elementos básicos en el funcionamiento del mismo o por ser hábitats que contienen especies de flora endémicas, raras o amenazadas, se exponen en la tabla 9.3.

Asociaciones vegetales unitarias	Especies o géneros de interés
Matorral de <i>Sarcocornia fruticosa</i>	<i>Tamarix boveana</i> , <i>Limonium</i> , <i>Cistanche lutea</i> y <i>Cynomorium coccineum</i>
Matorral de <i>Arthrocnemum macrostachyum</i>	<i>Sarcocornia fruticosa</i>
Albardinal con <i>Limonium</i> sp. pl	<i>Limonium parvibracteatum</i> , <i>Limonium santapolense</i> , <i>Limonium furfuraceum</i> y <i>Senecio auricula</i> .
Tomillar de <i>Limonium cossonianum</i>	<i>Sarcocornia fruticosa</i> , <i>Arthrocnemum macrostachyum</i>

Tabla 9.3. Hábitats naturales prioritarios relacionados con el Saladar de Agua Amarga

Aunque el Saladar de Agua Amarga es posiblemente uno de los de menor importancia para las aves acuáticas del sur de Alicante, sí tiene cierta relevancia para sostener algunas pequeñas aves limícolas de gran interés conservacionista ya que puede actuar como área de campeo o alimentación de especies de las lagunas próximas. Dentro de las especies de fauna presentes en el área estudiada, ya sean reproductoras o usuarias ocasionales de la zona (campeo, alimentación, descanso), se ha considerado a las aves ligadas a zonas húmedas (tabla 9.4) como las especies prioritarias objetivo ante una posible alteración del medio físico en el saladar y ante los efectos causados por las medidas correctoras.

Nombre científico	Familia
<i>Burhinus oedinemus</i>	Burhinidae
<i>Vanellus vanellus</i>	Charadriidae
<i>Charadrius dubius</i>	Charadriidae
<i>Charadrius hiaticula</i>	Charadriidae
<i>Charadrius alexandrinus</i>	Charadriidae
<i>Pluvialis squatarola</i>	Charadriidae
<i>Glareola pranticola</i>	Glareolidae
<i>Limosa limosa</i>	Scolopacidae
<i>Limosa lapponica</i>	Scolopacidae
<i>Tringa totanus</i>	Scolopacidae
<i>Philomachus pugnax</i>	Scolopacidae
<i>Calidris alpina</i>	Scolopacidae
<i>Calidris canutus</i>	Scolopacidae
<i>Calidris minuta</i>	Scolopacidae
<i>Calidris alba</i>	Scolopacidae
<i>Calidris ferruginea</i>	Scolopacidae
<i>Arenaria interpres</i>	Scolopacidae
<i>Sterna sandvicensis</i>	Sternidae
<i>Sterna albifrons</i>	Sternidae

Tabla 9.4. Especies de aves prioritarias relacionadas con el Saladar de Agua Amarga

Además, existen especies localizadas en la zona de estudio y su entorno, incluidas en listados nacionales (Real Decreto 439/1990, de 30 de marzo, por el que se regula el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas, dictado en desarrollo de la Ley 4/1989, de 27 de marzo) e internacionales (Directiva 79/409/CEE referente a la Conservación de las Aves Silvestres, Directiva 92/43/CEE relativa a la Conservación de las Hábitats Naturales y de la Fauna y Flora Silvestres y su modificación), como protegidas, raras o amenazadas (tabla 9.5).

Anfibio	Aves	
Pelobates cultripes	Circus pygargus	Emberiza schoeniclus
	Circus aeruginosus	Chlidonias niger
	Accipiter gentilis	Ardeola ralloides
	Porphyrio porphyrio	Larus audouinii
	Sterna albifrons	Oxyura leucocephala
	Marmaronetta angustirostris	Plegadis falcinellus
		Aythya nyroca

Tabla 9.5. Especies animales consideradas como protegidas, raras o en peligro, incluidas en listados nacionales e internacionales

Los aspectos ecológicos del saladar fueron contemplados en el estudio de impacto ambiental que se realizó en el año 2005 (MCT-Sedelam, 2005), para la ampliación de la DA-I, de cara a poder establecer una valoración del medio biótico y su relación con el medio físico, vertebrada especialmente en la concentración salina en agua y suelo y la presencia estacional de aguas freáticas y superficiales. Dicho informe valora la biodiversidad de estas comunidades como aceptable, pero reducida en comparación con sus vegetaciones potenciales. En caso de producirse una depresión continua del nivel piezométrico, ésta supondría, por un lado, una disminución apreciable de disponibilidad de la lámina de agua estacional, que iría en detrimento de las posibilidades de alimentación de la fauna y, por otro, la pérdida de masa vegetal, que modificaría las condiciones del entorno afectando a los seres vivos que en él campean.

9.3. AFECCIONES MEDIOAMBIENTALES POTENCIALES Y PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DEL HUMEDAL

Como se mencionó en el Capítulo 7, el modelo hidrológico conceptual inicial de funcionamiento del acuífero, plantea un régimen dinámico en el que se produce una descarga natural desde el continente hacia el mar a través de la línea de costa del saladar, alterado por las captaciones de las desaladoras DA-I y DA-II. Por otra parte, la salinidad de las aguas

continentales está muy condicionada por la actividad de la industria salinera del siglo pasado (Capítulo 8).

La modificación en el esquema de circulación hídrica subterránea conlleva un abatimiento de niveles piezométricos, afectando a la lámina de agua superficial que cubre parcial y ocasionalmente el saladar y, sobre todo, a la subterránea somera. La constatación de alteración del régimen subterráneo provocada por la actividad extractiva en el acuífero se ha puesto de manifiesto mediante el abatimiento progresivo de los niveles piezométricos (Capítulo 7) y la ausencia de encharcamiento desde la puesta en funcionamiento de las desaladoras. Esto ha generado un cambio en las condiciones de humedad y salinidad en el humedal, que puede afectar a las comunidades vegetales ligadas al saladar y sus hábitats de interés comunitario, y un riesgo potencial de pérdida de hábitats para la fauna, como se justificó al final de la sección anterior.

La figura 9.1 muestra las líneas de isoprofundidad del agua subterránea, correspondientes a la campaña de enero de 2009 (máximos descensos registrados), condicionadas por los bombeos de extracción de las desaladoras DA-I y DA-II en régimen permanente. Dentro del saladar, las zonas con mayores descensos están localizadas en los esteros próximos a las captaciones de las desaladoras; en el caso de la DA-I, próximas a los pozos verticales de extracción (7,97 m, en el D-2), y en el caso de la DA-II, próximas a los pozos inclinados del túnel (7,36 m, en el P-14).

Comprobadas las alteraciones en el medio físico, se planteó un marco para el establecimiento de medidas correctoras y compensatorias encaminadas a la recuperación de los valores naturales del humedal. De acuerdo con la Declaración de Impacto Ambiental (MCT-Sedelam, 2005), se optó por el vertido de agua de mar sobre la superficie del saladar. Para la consecución de este propósito, se diseñó una red de bombeo para los vertidos y se planificó un programa de riegos distribuido en el tiempo y el espacio, sujeto a criterios hidrogeológicos y ambientales.

Los esteros del saladar se agruparon en tres zonas; Z-I, Z-II y Z-III (figura 9.2). Del estudio conjunto de los mapas de piezometría e isoprofundidad se dedujo que los vertidos se llevarían a cabo, en una primera fase, en los esteros más septentrionales, esto es, los situados en la parcela norte (Z-I), que eran los más deprimidos por la acción de las extracciones realizadas en la DA-I, desde el año 2003. De esta manera se provocaría un doble efecto: la recuperación de los niveles en la zona más afectada y la creación de un efecto barrera ante el flujo procedente del continente, con la idea de evitar la desecación de las zonas interiores y meridionales del saladar, disminuyendo el gradiente hidráulico en esta zona.

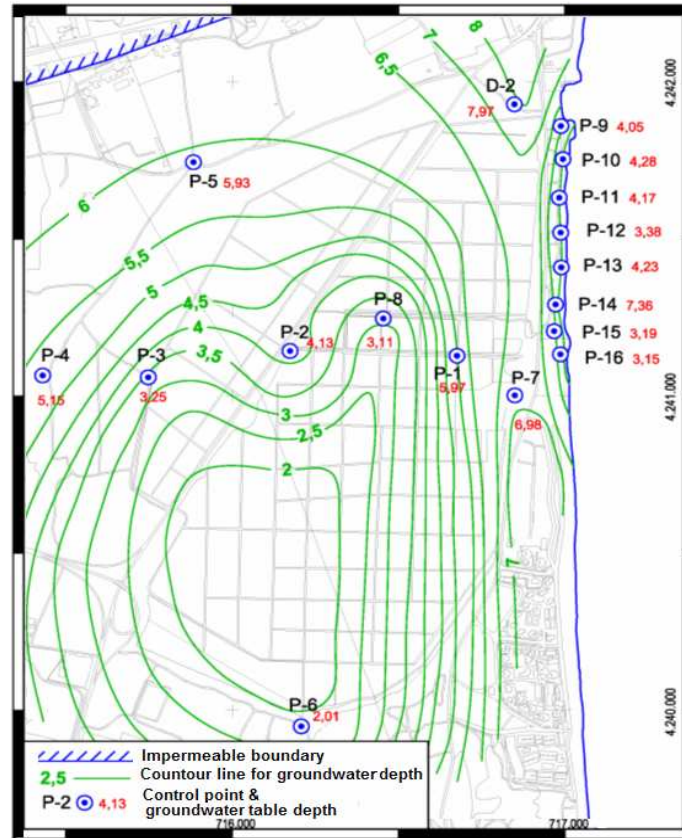


Figure 9.1. Líneas de isopropundidad del agua subterránea, campaña enero de 2009



Figure 9.2. Agrupación de las parcelas o esteros en zonas a efectos del programa de vertidos

De cara a evaluar los volúmenes de agua requeridos para la restauración del humedal, se realizó un modelo numérico de flujo (MCT-Sedelam, 2005). La figura 9.3 muestra los resultados de la simulación, realizada para esta memoria mediante SEAWAT, para un modelo de flujo y transporte y un escenario similar. Los vertidos se modelaron imponiendo una recarga permanente de agua de salinidad igual al mar en la Z-I (figura 9.2). De la modelización se concluye que, manteniendo dicha recarga durante un periodo mínimo de 6 meses, los niveles piezométricos aumentan

alcanzando la superficie topográfica en las zonas Z-II y Z-III (figura 9.3b). Estas condiciones permitirían una recuperación muy aceptable para el desarrollo y mantenimiento del ecosistema superficial. El volumen de infiltración asumido en esta simulación fue de $150000 \text{ m}^3/\text{mes}$.

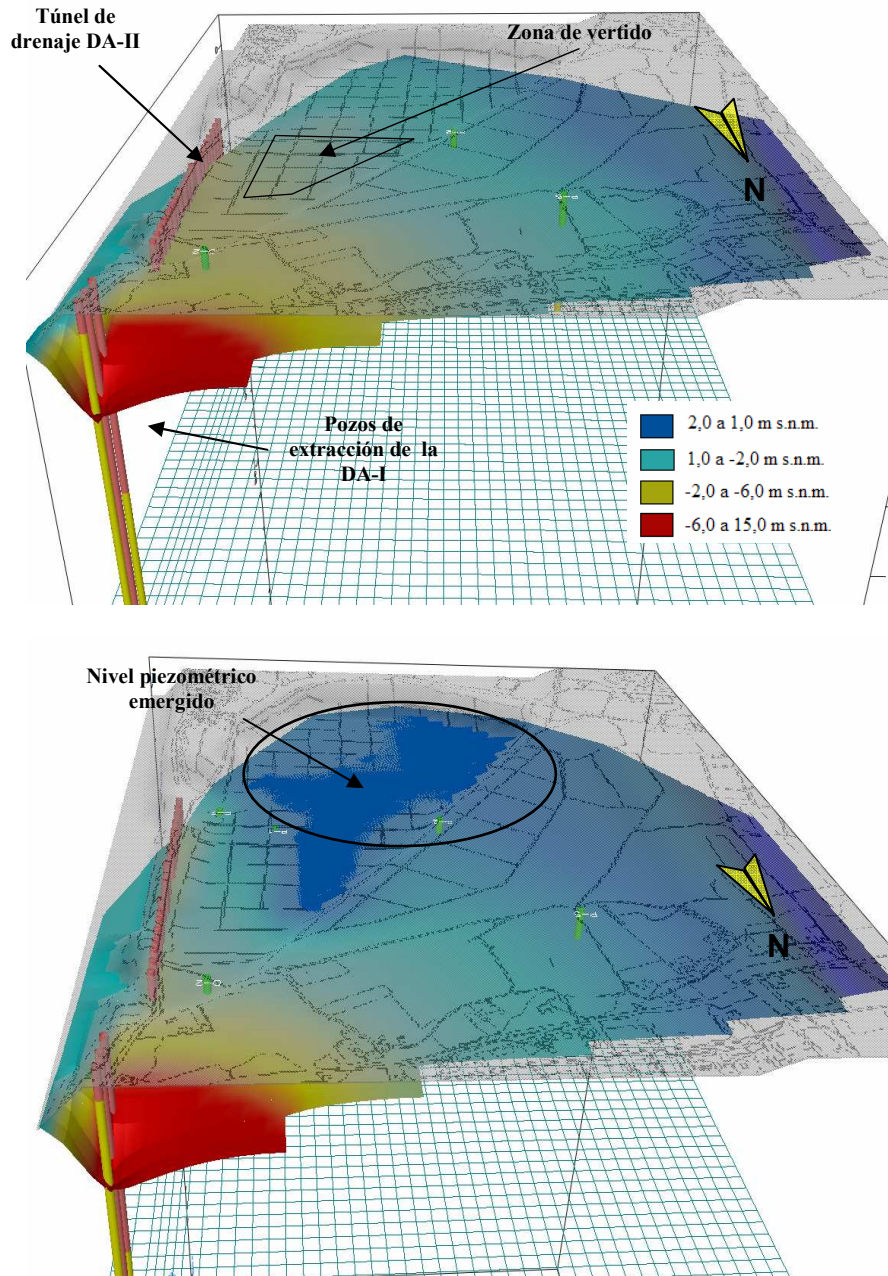


Figura 9.3. Resultados de la modelización con Seawat. Anterior al vertido (superior) y posterior al vertido (inferior)

Se construyó un dispositivo perimetral de conducción de agua en torno a las parcelas de las zonas Z-I, Z-II y Z-III, con 26 bombas de impulsión para el vertido de $250 \text{ m}^3/\text{h}$ de capacidad máxima cada una de ellas. El agua se tomaría desde la cántara de almacenamiento

de la DA-II. Las bocas de riego quedaron distribuidas espacialmente como se muestra en la figura 9.4. La foto 9.3 muestra detalles de las arquetas y las bocas de bombeo en funcionamiento.



Foto 9.3. Arquetas y bombas de descarga en funcionamiento

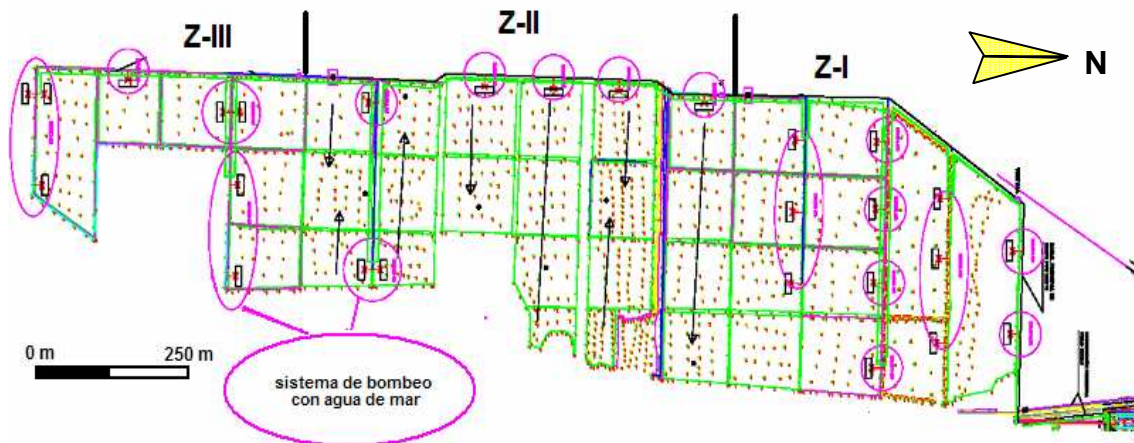


Figura 9.4. Sistema perimetral de tuberías y bombas en torno al saladar

La información proporcionada por el modelo numérico realizado por Sedelam (MCT-Sedelam, 2005), conjuntamente con las medidas de campo, sirvió para que la MCT estableciera un cronograma de riegos para la optimización de la restauración hídrica, con vistas al mantenimiento de las condiciones naturales del ecosistema del humedal. Este programa sigue las directrices expuestas en el estudio de impacto ambiental de la ampliación de la DA-I (MCT-Sedelam, 2005).

La distribución espacio-temporal de los volúmenes vertidos responde, sobre todo, a criterios hidrogeológicos (seguimiento de las oscilaciones piezométricas) y biológicos. Una síntesis de las medidas contenidas en el programa se indica a continuación:

Octubre de 2009:

- Revisión visual del sistema de riegos: tuberías, boquillas, válvulas, bombas...
- Inspección de los esteros: estado de los caballones de separación entre esteros, posibles vías de fuga de agua hacia las vías de comunicación circundantes...
- Corrección de problemas, si los hubiera.

Noviembre de 2009:

- Prueba de funcionamiento del sistema de riego,
- Vigilancia de posibles escapes de agua hacia vías de comunicación de los alrededores,
- Corrección de problemas, si los hubiera.

Diciembre de 2009:

- El día 1 comienza el llenado de las zonas I y II,
- La zona II se mantendrá con lámina de agua hasta mayo de 2010, dejándola evolucionar de manera natural hasta el mes de octubre, momento en que se volverá a llenar,
- La zona I se dejará evolucionar de forma natural hasta mayo de 2010, volviéndose a llenar entonces,
- Se llevará a cabo una vigilancia continua de la evolución de los esteros y se aplicarán medidas correctoras si surgieran problemas.

Mayo de 2010:

- Se llenará la zona III, dejándola evolucionar de manera natural hasta mayo del siguiente año,
- Llenado de la zona I,
- Se llevará a cabo una vigilancia continua de la evolución de los esteros y se aplicarán medidas correctoras si surgieran problemas.

El programa de inundaciones a largo plazo es el siguiente:

- Zona I: llenado puntual en octubre y en abril. El resto del año, se permite la evolución natural del agua de los esteros,
- Zona II: llenado en octubre y mantenimiento de la lámina de agua hasta mayo, mes a partir del cual se deja evolucionar la zona de manera natural,

- Zona III: llenado puntual en mayo. El resto del año se permite la evolución natural de los esteros. Se ha modificado ligeramente respecto a las previsiones del estudio de impacto ambiental debido a los resultados arrojados por el seguimiento piezométrico realizado, que indica que en la zona III la afección de las extracciones es menor.

9.4. MODIFICACIONES EN LA PROFUNDIDAD DEL AGUA CON LA RESTAURACIÓN

De acuerdo con el programa de vertidos, durante el periodo diciembre 09 a julio 10, se mantuvo una lámina de agua casi permanente sobre las parcelas más afectadas del saladar (foto 9.4). La relación de volúmenes en función de la zona de vertido se expone en la tabla 9.6 y figura 9.5. En julio de 2010 se realizó una campaña de piezometría en la que se verificó la modificación en el régimen de flujo causada por los vertidos sobre el saladar (figura 7.18). Los vertidos ocasionaron, por un lado, un domo piezométrico en la parte central que causó un ascenso generalizado de los niveles en las inmediaciones entre 1.5 y 4.5 m y, por otro, la disminución del gradiente hidráulico en sentido norte, como se había previsto en la modelización. En el mapa de isoprofundidades (figura 9.6), se constató un ascenso generalizado bajo el saladar comprendido entre 1.5 y 5.0 m respecto a la situación de enero de 2009 (figura 9.1).

Volúmenes mensuales m ³				
Fecha	Z-I	Z-II	Z-III	Total
dic-09	89294	48706	0	138000
ene-10	97680	47520	0	145200
feb-10	25600	32000	0	57600
mar-10	9600	14400	0	24000
abr-10	0	28800	0	28800
may-10	44089	18992	76561	139642
jun-10	149400	0	0	149400
jul-10 *	54000	0	0	54000

* datos hasta 15 de julio

Tabla 9.6. Volúmenes de riegos vertidos sobre el saladar

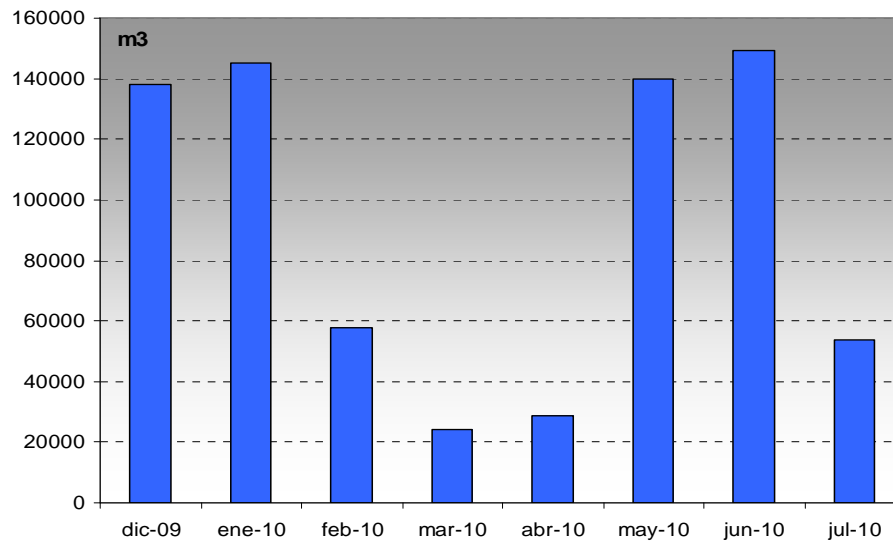


Figura 9.5. Volúmenes totales mensuales vertidos sobre el saladar

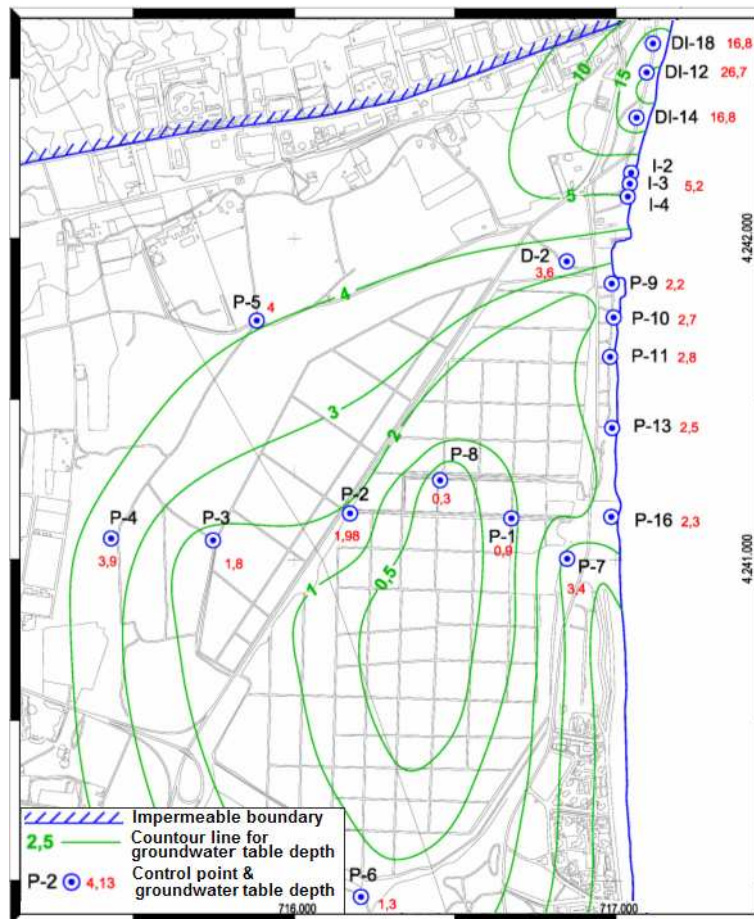


Figura 9.6. Líneas de isoprofundidad del agua subterránea, campaña de Julio de 2010

Dados los resultados positivos obtenidos, se tiene previsto continuar con el seguimiento piezométrico mensual para obtener información que permita un ajuste óptimo de la programación de vertidos en el espacio y en el tiempo. Teniendo en cuenta todas estas

consideraciones, se espera que las afecciones potenciales en relación con el régimen hidrológico del saladar sean mínimas. A petición de la MCT, desde julio de 2010 el Departamento de Ciencia y Tecnología Agraria junto con el Departamento de Producción Vegetal de la UPCT, llevan a cabo campañas de campo para el control de la evolución de los hábitats y de las comunidades vegetales existentes, con el objetivo de examinar su recuperación en los sectores más afectados por las depresiones del nivel piezométrico (UPCT-MCT, 2010c).



Fotos 9.4. Detalles de los esteros inundados

9.5. MODIFICACIONES DE LA SALINIDAD DEL ACUÍFERO

Como se ha mencionado, la salinidad del acuífero ha sido sucesivamente alterada por intervenciones antrópicas. La cronología de estas actuaciones comprende los periodos 1925-1975 para la industria salinera (Senderos de la sal, www.medioambiente.ladipu.com), de 2003 hasta hoy para la explotación de la DA-I, de 2008 hasta hoy para la DA-II y de diciembre de 2009 a julio de 2010 para los vertidos.

La aportación de sales a los terrenos del saladar debido a la explotación salinera, aunque obvia, se ha podido constatar en los sondeos realizados en el marco de las campañas de investigación previas a la instalación de las desaladoras, en los que se encontraron cristales de sal en los testigos de sondeos. La contaminación causada sobre el acuífero se aprecia en los valores de conductividad eléctrica anormalmente altos, superiores a 200 mS/cm, en las aguas de los piezómetros del saladar (P-8 y P-1), así como en los registros de conductividad eléctrica superior a la del mar en algunos pozos de extracción de la DA-I y en el agua procedente del drenaje del túnel (Capítulo 7).

Un efecto añadido de la contaminación salina es la alteración de la cuña natural de intrusión marina en el continente. Los escenarios estudiados en el Capítulo 8 corroboran esta afirmación: durante el periodo de tiempo comprendido entre el cese de la explotación salinera

y el comienzo de la actividad de las desaladoras, se debió producir una retracción de la cuña marina empujada por las aguas contaminadas bajo el saladar. Por otro lado, los parámetros hidrogeológicos del acuífero, en particular los valores relativamente bajos de permeabilidad de los materiales del Cuaternario continental (0,003 a 0,8 m/d) y la escasa recarga, tanto desde el continente como en superficie, condicionan el proceso natural de desalinización del acuífero extendiéndolo en el tiempo, probablemente, varias décadas.

En síntesis, la actividad salinera ha contaminado el acuífero, impidiendo la posible explotación del mismo en la zona del saladar para usos convencionales (agrícolas e industriales). Sin embargo, las condiciones de salinidad creadas en superficie han generado de forma natural el desarrollo de un humedal con hábitats tipo costero y de vegetación halofítica, hasta el punto de que ha sido reconocido como Parque Natural Municipal integrado en el catálogo de Zonas Húmedas de la Comunidad Valenciana, cuya preservación es hoy día objetivo prioritario.

La explotación de las desaladoras DA-I y DA-II incide en el acuífero alterando su régimen hídrico (Capítulo 7) e, indirectamente, su salinidad. Por un lado, las depresiones causadas por las extracciones (figura 9.1) afectan a la lámina de agua que de forma natural se desarrollaba estacionalmente sobre el saladar, generando un peligro potencial sobre el ecosistema desarrollado en superficie. Por otro lado, las extracciones junto a la costa sirven de barrera a la intrusión marina junto a las captaciones, impidiendo la penetración de ésta en el continente (Capítulo 8). No obstante, lejos de las captaciones, la intrusión marina penetra en el continente merced a la depresión causada por el desplazamiento de parte del agua continental hacia éstas. Además, las extracciones provocan que el agua continental, en su trayectoria hacia las captaciones, arrastre sal desde los terrenos del saladar (trayectorias de partículas, figura 8.51) contribuyendo al proceso natural de desalinización (Capítulo 8).

La última intervención antrópica que modifica el régimen hídrico y la salinidad del acuífero es el vertido de agua de mar sobre la superficie del saladar. El efecto hídrico inmediato es la recuperación de los niveles piezométricos (figura 9.6), eliminando el riesgo potencial de pérdida de hábitats en superficie. Por otro lado, pese a que los vertidos suponen una aportación de sales al acuífero, aunque en mucho menor grado que la causada por la industria salinera, el régimen hídrico impuesto por las captaciones arrastra este agua de vertido hacia la costa (mapas de piezometría del Capítulo 7), impidiendo que la contaminación salina invada zonas más continentales del acuífero (figura 8.60). Este fenómeno también se confirmó con los registros de temperatura del pozo D-2, ubicado entre el saladar y los pozos de extracción de la DA-I (figura 7.65). Es importante considerar que, debido al estado de contaminación salina previo a los vertidos, estos no suponen un incremento apreciable de la misma; más aún, dichos vertidos, mientras duran, permiten

rebajar los niveles de concentración (Capítulo 7), contribuyendo al proceso natural de desalinización.

Del estudio de los aspectos ambientales y antrópicos del escenario de Agua Amarga, e independientemente de la existencia o no de saladares, se podría aconsejar la creación potencial de humedales artificiales sobre acuíferos costeros que reúnan ciertas condiciones (acuífero de interés local, con parámetros hidrogeológicos apropiados, cuya calidad o volumen de agua no compensa su explotación para consumo directo), combinando la instalación de plantas desaladoras abastecidas mediante captaciones en el propio acuífero, con un programa planificado de vertidos. La simbiosis de este proceso traería consigo importantes beneficios, como la creación de nuevos hábitats para la fauna y flora, la utilización del propio acuífero para filtrar las aguas a desalar; y la contención de la cuña de intrusión marina a través de pozos del continente junto a la línea de costa.

Finalmente hay que decir que la investigación desarrollada en esta memoria, en relación con el conjunto de intervenciones antrópicas en el acuífero costero del Saladar de Agua Amarga, permite afirmar que es posible armonizar la explotación de un recurso natural (el agua subterránea) y la preservación del medio ambiente (mantenimiento y/o creación de humedales).

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES

10. CONCLUSIONES

Se pueden extraer las siguientes conclusiones, que agruparemos según su carácter general o específico.

10.1. DE CARÁCTER GENERAL:

- A) Se ha definido el acuífero costero de Agua Amarga como multicapa y constituido por dos niveles permeables: uno superior de carácter libre-semiconfinado, formado por al menos 60 m de un conjunto detrítico del Cuaternario y el Plioceno superior (calcarenitas, arenas, limos, caliches y areniscas), cuyo impermeable de base lo constituyen unos 40 m de margas y limos del Plioceno inferior; y otro inferior carbonatado y confinado de más de 100 m de espesor del Messiniense superior, del que se disponen pocos datos y, en consecuencia, apenas se ha tratado. En relación con el superior, presenta una conexión hidráulica con el mar fundamentalmente a través de los materiales calcareníticos del Tirreniense. La relación hidrogeológica entre capas, dentro del acuífero superior, está condicionada por la presencia de discontinuidades, cambios laterales de facies y variaciones de espesor. Al oeste, el límite está abierto y conectado hidráulicamente con el Cuaternario del Campo de Elche. Al norte, el límite viene condicionado por los afloramientos margosos del Plioceno inferior en la Sierra del Colmenar; y al sur, por un umbral piezométrico situado entre Urbanova y el Aeropuerto de El Altet. Presenta una extensión de aproximadamente 10 km².
- B) La salinidad de sus aguas, determinada por factores climáticos, geológicos, antrópicos y por la intrusión marina, condiciona la piezometría y el régimen de flujo.
- C) El régimen dinámico en el acuífero está condicionado por las captaciones de las desaladoras DA-I y DA-II.
- D) Se ha demostrado que existe una conexión hidráulica entre el acuífero de Agua Amarga y el mar por los siguientes hechos:
 - La calidad química de las aguas subterráneas captadas por los pozos de extracción de las desaladoras corresponde a una mezcla entre agua de mar (en mayor proporción) y agua continental.
 - La caracterización isotópica de las aguas procedentes de las captaciones se sitúa en torno a la del agua de mar.
- F) La investigación desarrollada en esta memoria, en relación con el conjunto de intervenciones antrópicas en el acuífero costero del Saladar de Agua Amarga, permite afirmar que es posible armonizar la explotación de un recurso natural (el agua

subterránea) y la preservación del medio ambiente (mantenimiento y/o creación de humedales).

- G)** Se ha caracterizado físicamente el escenario anisótropo (2-D) de intrusión marina, en presencia de saladares cercanos, mediante la adimensionalización discriminada de las ecuaciones de gobierno, utilizando el programa FATSIM-A elaborado especialmente con este objeto para esta memoria. Los grupos adimensionales obtenidos mejoran cualitativamente los resultados clásicos en dos aspectos: El escenario queda caracterizado por un menor número de grupos, y éstos, del orden de magnitud unidad, tienen un significado físico claro en términos de balance de magnitudes del problema.

10.2. DE CARÁCTER ESPECÍFICO.

10.2.1. En relación con la piezometría:

- Podemos concluir que la piezometría del acuífero es muy sensible a las acciones externas. Esto es debido a que las dimensiones del mismo son relativamente pequeñas, lo que confirma que los límites están bien establecidos.
- Los eventos lluviosos significativos ocurridos en la zona quedan reflejados en ascensos de los niveles piezométricos, de forma casi inmediata.
- Las variaciones de los volúmenes extraídos para las desaladoras (aumento en julio y agosto de 2009 y disminución en octubre, noviembre y diciembre de 2009), son coherentes con descensos y aumentos de los niveles piezométricos.
- El efecto de los vertidos de agua de mar sobre la superficie del saladar se aprecia en todos los piezómetros, que han alcanzado los niveles piezométricos más altos desde que se realizan registros en los mismos. Por el contrario, el cese de los vertidos produce un descenso generalizado de niveles en todos los sondeos.
- Existe un conoide provocado por las extracciones de la DA-I al noreste del saladar y junto a la línea de costa, donde se alcanzan cotas en torno a -13 m s.n.m. Bajo el saladar transcurre un eje de drenaje principal de dirección norte-sur, donde los niveles piezométricos se sitúan entre 0,5 (al sur) y -7,0 m.s.n.m. (al norte).
- El radio de influencia de las captaciones se sitúa a poco más de 2 km de la línea costa.

10.2.2. En relación con la hidroquímica:

- Los análisis químicos demuestran la existencia de procesos de mezcla en las aguas subterráneas en los que intervienen aguas meteóricas y continentales procedentes de la

aportación lateral, aguas contaminadas por el saladar y agua de mar. Las muestras de agua subterránea del acuífero estudiadas pertenecen a facies tipo clorurada sódica.

- Las aguas subterráneas de los alrededores de la zona de estudio se caracterizan por ser aguas salobres, con conductividades eléctricas en torno a 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Las conductividades eléctricas en la zona de estudio oscilan entre 6000-15000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para las aguas continentales; 50000-60000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para el agua del túnel; 55000-65000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para el agua de los pozos de captación de la DA-I; valores iguales o superiores a 60000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el acuífero profundo; y muy superiores a los 60000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (se han llegado a medir valores de hasta 310000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el P-8, el 9-1-10) en el saladar.
- Los registros de conductividad eléctrica están condicionados por la heterogeneidad del medio y por la existencia de un “depocentro” salino fruto de la actividad de la industria salinera (localización de los calentadores).
- Existe una tendencia general a la disminución de la conductividad eléctrica con el tiempo de los pozos de la DA-I y a estabilizarse en torno a la del agua de mar.
- La conductividad eléctrica de las aguas procedentes de la DA-II se sitúan por encima de la del agua de mar y depende del régimen de extracción de la misma. Dicha conductividad está probablemente ligada a la relación entre el caudal captado por las PHD y el procedente del túnel.
- Los registros de conductividad eléctrica de las captaciones, de valores por encima de la del agua de mar, están influenciados por la existencia del saladar.
- Se aprecia un aumento de conductividad eléctrica con la profundidad, que responde a una estratificación hidroquímica por gravedad, con un salto en los valores a partir de cierta profundidad (en función de la ubicación de los piezómetros). Esto se debe a la presencia de las salmueras. En los piezómetros situados en la línea de costa no se aprecia estratificación, siendo los registros iguales a los del agua de mar o ligeramente por encima. En los pozos de control situados junto a las captaciones de la DA-I tampoco se aprecia estratificación debido a la homogenización producida por la proximidad a las captaciones, siendo los valores registrados igual o ligeramente por encima de los del agua de mar.
- Los aumentos de salinidad en las extracciones de la DA-I y en los piezómetros en el segundo semestre de 2009 se explican por las intensas lluvias caídas en dicho periodo, que han producido un incremento de la recarga procedente del acuífero inferior Messiniense (de mayor salinidad) y han disuelto sales del saladar en su proceso de infiltración.

- Los vertidos con agua de mar han provocado una dilución de las aguas bajo el saladar, que se ha constatado en los registros de conductividad eléctrica de los piezómetros del saladar y de la línea de costa, aproximando sus valores a los del agua de mar.
- El componente químico de mayor concentración en las aguas subterráneas bajo el saladar, es el cloruro sódico.
- Los análisis isotópicos demuestran que las aguas subterráneas son el resultado de la mezcla de agua de mar, agua meteórica y aguas expuestas a evaporación.
- Las variaciones de la temperatura de las aguas del acuífero responden a las oscilaciones de la misma en el agua de mar (piezómetros junto a la línea de costa) y a las variaciones anuales de la temperatura del terreno (piezómetros alejados del mar).

10.2.3. En relación con la intrusión marina:

- Merced a los resultados de análisis químicos de muestras de agua tomadas con anterioridad al inicio de la explotación del acuífero, en pozos de investigación situados al norte del saladar (junto a las captaciones de la DA-I), se puede afirmar la existencia de intrusión marina en dicha zona y en dicho momento.
- Bajo el saladar, debido a la presencia de salmueras, se produce intrusión inversa en la zona de costa (parte este del saladar) y reubicación del frente de intrusión en la zona continental (parte oeste del saladar).
- Las captaciones de la DA-I provocan mayor intrusión entre éstas y la línea de costa, y evitan que penetre mas allá de las mismas por el efecto barrera ocasionado por los conos de bombeo. Sin embargo, lejos de las captaciones (en la zona más continental del saladar) se produce un avance del frente de intrusión (hacia el continente) debido a que parte del agua continental es derivada hacia las captaciones. De acuerdo con los resultados de la simulación, el pie de ha podido avanzar hasta 400 m, situándose en torno a 1200 m respecto a la línea de costa

10.2.4. En relación con el balance:

- El agua procedente de las captaciones de las desaladoras presenta características químicas muy similares a la del agua del mar. Este resultado es coherente con los cálculos del balance realizados a partir de la caracterización isotópica, que confirman que el porcentaje de agua de mar hacia las captaciones, en relación con el caudal neto de extracción, es del 88,2 % (DA-I) y del 98,9 % (DA-II).

- La descarga de agua continental desde el acuífero superior hacia las captaciones se estima en torno a 4,1 hm³/a.
- La descarga de agua continental hacia el mar se sitúa en torno a 3,5 hm³/a (sin considerar los vertidos, y de 4,6 si se tienen en cuenta) y se produce principalmente al sur del saladar.
- El balance está equilibrado, como es lógico, ya que estamos ante un acuífero con régimen permanente, en donde el mar suministra hasta ahora los caudales extraídos merced a la elevada transmisividad.

10.2.5. En relación con la recuperación del humedal:

- La restauración de los niveles piezométricos mediante vertidos con agua de mar, objetivo perseguido por el plan de restauración ambiental de la MCT, ha sido llevada a cabo con éxito como denotan los mapas de piezometría o isoascensos. Este ascenso de niveles supone una mejora sustancial de las condiciones necesarias para el desarrollo y mantenimiento de la flora y, en consecuencia, del ecosistema del saladar.
- A nivel químico, el uso de vertidos en este escenario no ha traído consigo la contaminación salina de las aguas subterráneas sino que, al contrario, ha provocado un efecto de dilución de las mismas.

10.2.6. En relación con la modelización:

Se ha simulado con SEAWAT el escenario de los procesos que tienen lugar en el acuífero de Agua Amarga a partir de un modelo conceptual que incluye: i) la integración de los parámetros hidrogeológicos deducidos de los ensayos de campo, ii) la geometría derivada de las campañas de campo y de la revisión bibliográfica, iii) las acciones antrópicas y iv) las condiciones de contorno e iniciales derivadas, así mismo, de resultados de la investigación.

El escenario se ha dividido en periodos de tiempo coherentes con la cronología de las acciones antrópicas con objeto de obtener información diferenciada de los efectos de cada una de ellas. Los patrones de flujo y concentración resultado de la simulación reproducen de forma cualitativa, y en menor grado cuantitativa, los procesos de flujo y transporte que tienen lugar en el acuífero.

Entre las aportaciones que arroja la simulación podemos destacar:

- Los acusados cambios de piezometría con la profundidad asociados a la distribución de concentraciones, aspecto que no se ha contemplado en las medidas de campo (cambios causantes de los flujos de recirculación en el acuífero).

- Las modificaciones de la cuña de intrusión en el entorno del saladar, producidas por las diferentes intervenciones antrópicas, son coherentes con los resultados previstos y mencionados en el punto 10.2.3 anterior.
- La piezometría del escenario 4 (desaladoras en funcionamiento) reproduce aceptablemente la elaborada a partir de los datos de campo. Destaca la aparición de un eje de drenaje de dirección norte-sur bajo el saladar y la de un conoide de bombeo junto a las captaciones de la DA-I.
- Las observaciones realizadas en los registros de conductividad de la DA-I y de la DA-II son coherentes con las observaciones realizadas en el escenario 4.
- La dilución de las aguas en las capas más superficiales del acuífero, por efecto de los vertidos, se reproduce en el periodo 1 del escenario 5.
- Los balances hídricos simulados antes y después de los vertidos, proporcionan caudales muy aproximadamente iguales a los deducidos a partir de los datos experimentales disponibles. El flujo neto que entra en la zona 1 procedente de la 2 (el mar) supone un 89,7 % (valor muy próximo 88,2% estimado) en el escenario 4 y 85,3 % en el 5.

REFERENCIAS

- Abarca E., Vazquez-Suñé E., Carrera J., Capino B., Gámez D. y Battle F. (2006). Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water Resources Research*, 42 (9), Art. N° W09415.
- Ackerer P., Younes A. y Mosé R. (1999). Modelling variable density flow and solute transport in porous medium: 1. Numerical model and verification. *Transp. Porous Media* 35 (3) 345-373.
- ACRI (1994). PORFLOW User's Manual, version 2.50.
- Alcaraz F., Díaz T.E., Rivas Martínez P. y Sánchez P. (1989). Datos sobre la vegetación del SE de España: provincia biogeográfica Murciano-Almeriense. *Itinera Geobotánica* 2: 5-133.
- Alfaro P., Andreu J.M., Estévez A., Tent-Manclús J. E. y Yébenes A. Editores (2004). *Geología de Alicante*.
- Alhama I., Rodríguez Estrella T. y Alhama F. (2010a). Dynamic of the freshwater-seawater transition zone in the Agua Amarga aquifer caused by wetland spilling from the sea. *European Groundwater Conference . Proceedings*, p.151. Madrid.
- Alhama I., Rodríguez Estrella T. y Montero J. (2010b). Hydrology control of the agua amarga aquifer and the nearby wetlands as regards the Alicante I and II desalination plants. *European Groundwater Conference. Proceedings*, p.173. Madrid.
- Alhama I., Soto Meca A. Rodríguez Estrella T. y Alhama, F. (2010c). Characterization of scenarios of salt intrusion in coastal aquifers with salt flats. *Proceedings of the Salt Water Intrusion Meeting, SWIM, Portugal*.
- Alhama I., Soto Meca A. y Alhama F. (2010d). Dimensional parameters of the Henry problem when diffusive effects are negligible. *Proceedings of the Salt Water Intrusion Meeting SWIM, Portugal*.
- Alhama I., Soto A. y Alhama F. (2010e). Control parameters of the anisotropic extended elder problem by discriminated dimensional analysis. *International Groundwater Symposium, IAHR, Valencia*.
- Alhama I., Soto A. y Alhama F. (2010f). Simulation of geothermal flow in anisotropic domain by network method. The Yusa problema. *International Groundwater Symposium, IAHR, Valencia*.
- Alhama I., Soto Meca A., Marín J. y Alhama F. (2010g). Programa de ordenador: FATSIM-A (Flow and Transport Simulator). © UPCT. Reg. Gen. Propiedad Intelectual, NAR: 08/2010/1110. Murcia
- Alhama I., Soto Meca A. y Alhama F. (2010h). Simulador de flujo y transporte FATSIM-A. Aplicaciones docentes y de investigación (con CD del programa FATSIM-A). 260 pp. Servicio de publicaciones de la UPCT (MORPI).
- Alhama I., Soto Meca A. y Alhama F. (2010i). A comparison between classical and discriminated dimensionless parameters that define the Henry problem. *Enviado a J. Hydrology (en revisión)*.
- Alhama F. y Madrid, C.N. (2010). Aplicaciones del análisis dimensional discriminado al estudio de problemas avanzados de mecánica de fluidos y transmisión de calor. Ed, Reverté (en prensa), Madrid
- Álvarez Rogel J., Alcaraz F. y Ortiz R. (2000). Soil salinity and moisture gradients and plant zonation in Mediterranean SALT marshes of Southeast Spain. *Wetlands* 20(2): 357-372.

- Álvarez-Rogel J., Carrasco L., Marín C.M and Martínez-Sánchez J.J. (2007). Soils of a dune coastal salt marsh system in relation to groundwater level, micro-topography and vegetation under a semiarid Mediterranean climate in SE Spain. *Catena*, Volume 69, Issue 2, Pages 111-121.
- Álvarez Rogel J., Ortiz R. y Alcaraz F. (2001). Edaphic characterization and soil ionic composition influencing plant zonation in a semiarid Mediterranean salt marsh. *Geoderma* 99:81-98.
- Amezaga J. M., Santamaría L. y Green A. J. (2002). Biotic wetland connectivity-supporting a new approach for wetland policy. *Acta Oecologica*, Volume 23, Issue 3, pp 213-222.
- Appelo C.A.J. y Postma D. (2006). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd Ed. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Azema J. (1977). Étude géologique des zones externes des cordillères Bétiques aux confins des provinces d'Alicante et de Murcie (Espagne). Tesis Doctoral, Univ. Paris.
- Badon Ghijben W. (1989) Nota in verband met de voorgenomen put boring nabij Amsterdam. K.Inst. Ing. Tydschrift. The Hauge. p. 8-22.
- Barrow-Gordon M. (1972). *Química Física*, Ed. Reverte. Barcelona.
- Bear J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier.
- Bejan A. (1987). Convective heat transfer in a porous media. In: Kakac, S., Shah, R. K., y Aung, W. Eds. *Handbook of single-phase convective heat transfer*. Wiley, New York.
- Broome S.W., Seneca E.D. y Woodhouse W.W. (1988). Tidal salt marsh restoration. *Aquatic Botany*, Volume 32, Issues 1-2, p. 1-22.
- Bruckner H. (1986). Evolution and age of quaternary marine terraces in Morocco and Spain. *Z. Geomorphology*, 62, 83-101.
- Caracul J.E., Corbí H., Soria J.M., Usera J. y Yébenes A. (2005). Asociación de foraminíferos bentónicos y evolución paleoambiental del plioceno inferior en el sector de Elche-Crevillente /Cuenca del Bajo Segura, Alicante): Resultados preliminares. *Geogaceta*, 37, 191-194.
- Chandrasekhar S. (1961). *Hydrodynamic and hydromagnetic stability*, New York.
- Chang, R. (1992). *Química*. McGraw-Hill. Mexico
- Chen Z.M., Chen G.Q., Zhou J.B., Yang Z.F. y Zhou Y. (2009). Net ecosystem services value of wetland: environmental economic account. *Nonlinear Sci. Num. Simulat.*, 2837-2843.
- Clark I. y Fritz P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton. New York.
- Coats R., Swanson M. y Williams P. (1989). Hydrologic analysis for coastal wetland restoration. *Environmental management*. 13 (6) pp. 715-727.
- Cordier E. y Goblet P. (1991). Contribution of the analysis of RIVN brine migration experiments. INTRAVAL level 1. Commissariat à l'Énergie Atomique. Report LHM/RD/91/8, 12 p.
- Corlay J.P. (1993). Coastal wetlands: a geographical analysis and some projects for management. *Ocean & Coastal Management*, Volume 19, Issue 1, pp 17-36.
- Croucher A. E. y O'Sullivan M. J. (1995). The Henry problem for saltwater intrusion, *Water Res. Res.* 31 (7), 1809-1814.
- Cussler E. L. (1984). *Diffusion: mass transfer in fluid systems*. Cambridge Univ. Press, New York 525 p.

- Custodio E. y Llamas R.M. (1983). Hidrología Subterránea. (2ª ed.) Ediciones Omega. Barcelona.
- Darcy H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Librairie des Corps impériaux des ponts et chaussées et des mines. Paris.
- Diersch H.J. (1996). Interactive, graphics-based finite-element simulation system -FEFLOW- for modelling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes. FEFLOW User's Manual. Version 4.5.
- DIPUTACIÓN DE ALICANTE (1987). Campaña geofísica en el Campo de Elche.
- Dumas B. (1977). Le levant espagnol. La genèse du relief. Thesis. Univ Paris.
- Durán, J. J. (1989). Perspectiva general del karst en España. Sociedad Española de Geomorfología, monografía nº4, pp. 13-28, Madrid.
- Evans D.G. y Raffensperger J.P. (1992). On the stream function for variable-density groundwater flow. Water Res. Res. 28 (8) 2141-2145 .
- Farina A. (2000). Principles and methods in landscape ecology. Kluwer academic publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- FAST-C, ver Holzbecher (1998).
- FATSIM-A, Flow and transport simulator. (2010). UPCT ©.
- FCIHS (2009). Comisión Docente de Curso Internacional de Hidrología Subterránea, Hidrología. Ed., Barcelona.
- Fife P. C. (1970). The Bénard problem for general fluid dynamics equations and remarks on the Boussinesq approximation. Indiana Univ. Math. J. 20 (4) 303-326.
- Freeze R. A. y Cherry J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 604 p.
- Frind E. O. y Matanga G. B. (1985). The dual formulation of flow for contaminant transport modelling. 1. Review of theory and accuracy aspects. Water Res. Res. 21 (2) 159-169.
- Frolkovic P, y Schepper H. D. (2000). Numerical modelling of convective dominated transport coupled with density driven flow in porous media, Adv. Water Resour. 24, 1955-1974 p.
- Garay Martín, P. (1990). Evolución geomorfológico de un karst mediterráneo. El macizo de Mondúver (La savor, Valencia). Diputación de Valencia, pp.175. Valencia.
- Gardner W.H. (1986). Water Content. En A. Klute Ed. : Methods of soil análisis. Part I. Monograph 9. Am. Soc. Agronomy, Madison, WI: 493-544.
- Gawlik D.E. (2006). The role of wildlife science in wetland ecosystem restoration: Lessons from the Everglades. Ecological Engineering, Volume 26, Issue 1, pp 70-83.
- Georgiadis J. y Catton I. (1988). An effective equation governing convective transport in porous media. J. Heat transfer, 110 635-641.
- Giménez Forcada E., Fidelibus M.D. y Morell I. (1995). Metodología de Análisis de facies Hidroquímica aplicada al estudio de la intrusión marina en acuíferos detríticos costeros Aplicación a la Plana de Oropesa (Castellón). Hidrogeología 11: 55-72.
- Gopal B. y Mitsch W.J. Eds. (1995). The role of vegetation in created and restored wetlands. Ecol. Eng. 5, 1-121 (special issue).

- Gotovac H., Andricevic R., Gotovac B., Kozulic V. y Vranjes M. (2003). An improving collocation method for solving the Henry problem, *Journal of Contaminant Hydrology* 64, 129-149.
- Goy J.L. y Zazo C. (1988). Secuencias de Cuaternario marino en el Elche Basin (eastern Betic Cordillera, Spain). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 68, 301-310.
- Goy J. L., ZAZO C., SOMOZA L. y DABRIO C. (1990). Evolución paleogeográfica de la depresión de Elche-Cuenca del Bajo Segura (España) durante el Pleistoceno. *Estudios geológicos*, 46, 227-244.
- Gren Ing-Marie. (1995). Costs and benefits of restoring wetland: two Swedish case studies. *Ecological Engineering*, Volume 4, Issue 2, pp 153-162.
- Grohman A. (1987). Bedeutung und Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit. In: Aurand Ed. *Dir Trinkwasserverordnung*. Erich Schmidt Publ., Berlin, 308-309.
- Hubbert, M.K. (1940). The theory of ground-water motion. *J. of Geology* 48 (8), 785-944.
- Gutiérrez Elorza, M. y Peña Mone, J.L. (1989). El karst de la Cordillera Ibérica en el karst de España. *Soc. Esp. de Geomorf. Madrid*. 4 151-162.
- Hassannizadeh S. M. y Leijnse T. (1988). On the modelling of brine transport in porous media. *Water Res. Res.* 24, 321-330.
- Helbert A. W., Jackson C. P. y Lever D. A. (1988). Coupled groundwater flow and solute transport with fluid density strongly dependent upon concentration, *Water Res. Res.* 24, 1781-1795.
- Henry H. R. (1964a). Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers, in *Sea Water in Coastal Aquifers*, U.S. Geol. Surv. Supply Pap. 1613-C, 70– 84.
- Henry H.R. (1964b). Interfaces between salt-water and fresh water in coastal aquifers. *Sea water in coastal aquifers*. U.S.G.S. Water-supply. Washington. Paper nº 1613-C, p. C35/C70.
- Herzberg A. (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *Jour. Gasbelenschtung und Wasserversorgung*, 44. München. Pp.815-819, 842-844.
- Hickman S. (1994). Improvement of habitat quality for nesting and migrating birds at the des plaines river wetlands demonstrating project. *Ecol Eng.* 3, 485-494.
- Holzbecher E. (1997). Decay chain equilibria in a two-phase environment with linear sorption. *J. of Environmental Hydrology* 5.
- Holzbecher E. (1998). *Modelling Density-driven Flow in Porous Media*. Springer, Berlin.
- Holzbecher E. y Yusa Y. (1995). Numerical experiments on free and forced convection in porous media. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 38, 2109-2115.
- IAEA (in co-operation with UNESCO), (1983). *Isotope Hydrology*. Vienna (STI/PUB/650).
- I.G.M.E. (1973). Mapa geológico de España. E. 1:50.000. Hoja 893, Elche. Ministerio de Industria.
- I.G.M.E. (1974). Contaminación marina fósil en la Vega Baja del Valle del Segura. V Coloquio de investigaciones sobre el agua. San Sebastián, octubre 1973.
- I.G.M.E. (1983). Mapa Hidrogeológico de España. E. 1:200.000. Hoja 73, Alicante. Ministerio de Industria y Energía.
- I.G.M.E. (1985). Mapa Hidrogeológico de España. E. 1:200.000. Hoja 72, Elche. Ministerio de Industria y Energía.

- I.G.M.E.-DPA. (1994). Viabilidad del Almacenamiento Subterráneo y Recuperación (ASR) de aguas residuales en el Campo de Elche. www.igme.es.
- INTRAVAL (1991). Phase 1, Case 13, Final Report, 54 p.
- Jorgensen S.E. y Fath B. (2008). Encyclopedia of Ecology. Elsevier. Oxford, UK.
- Joseph D. D. (1976). Stability of fluids motion (II). Springer Publ., Berlin, 274 p.
- JSME, Jap. Soc. Mech. Eng. (1968). Steam Tales. Tokio.
- Julián, M. (1974). Formación et evolution de depressions karstiques au tours du Quaternaire récent (Alpae Maritimes). Mémoires et Documents. CNRS, II, pp. 151-159, Paris.
- Jutglar F. y Masó A. (1999). Aves de la Península Ibérica. Geoplaneta.
- Kazezyelmaz-Alhan C. M. y Medina M. A. (2008). The effect of surface/ground water interactions on wetland sites with different characteristics. Desalination, Volume 226, Issues 1-3, pp 298-305.
- Kentula M. E. (2000). Perspectives on setting success criteria for wetland restoration. Ecological Engineering, Volume 15, Issues 3-4, pp 199-209.
- Kinzelbach W. (1987). Numerische Methoden zur Modellierung des Transport von Schadstoffen im Grundwasser. Oldenbourg, München.
- Kolditz O., Ratke R., Diersch H-J. y Zielke W. (1998). Coupled groundwater flow and transport: 1. Verification of variable density flow and transport models, Adv. Water Resour. 21 (1), 27-46.
- Langevin Ch. D., Barcjay W. y Guo W. (2003). Modflow-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model. Tallahassee, FL USA
- Lee C. H. y Cheng R. T. (1974). On seawater encroachment in coastal aquifers, Water Res. Res. 10(5), 1039-1043.
- Levin S.A. (2007). Encyclopedia of Biodiversity. Elsevier, Editor-in-Chief: Simon A. Levin
- Maire, R. (1980). Eléments de karstologie physique. Spelunca, n°3, pp. 53, Paris.
- Maltby E. Ed. (2009). Functional Assesment of wetlands. Towards evaluations of ecosystem services. Woodhead publishing limited/Oxford and CRC press, Boca Raton.
- Maltby E., Hogan D.V. y Mcinnes R.J. (1996). Functional analysis of european wetland ecosystem-Phase I (FAEWE). European commission, Ecosystem research report No. 18. Office for official publications of the European communities, Luxembourg.
- MATLAB 6 (1997). MathWorks, Natick, MA (USA).
- MCT – MMA y U.T.E.: AQUAGEST LEVANTE S.A. – SEDELAM – INATE – EPPA – PROINTEC – Z_ORG (2005). “Proyecto de ampliación de la desaladora de la mancomunidad de los Canales del Taibilla en Alicante. Nueva Desaladora del Canal de Alicante, Documento nº 1; Memoria y Anejos”.
- MCT - PERFIBESA (Perforaciones ibéricas, S.A.), (2001a). “Informe referente al segundo sondeo de Investigación Hidrogeológica para la desaladora de Alicante” (actual P-9).
- MCT - PERFIBESA (Perforaciones ibéricas, S.A.), (2011b). “Informe referente al tercer sondeo de Investigación Hidrogeológica para la desaladora de Alicante. Sonda P-1” (actual P-3).
- MCT - PERFIBESA (Perforaciones ibéricas, S.A.), (2001c). “Informe referente a la realización de un aforo conjunto para la desaladora de Alicante: Sondeos P-I, P-II Y P-III” (Actuales P-3, P-6 y P-9 respectivamente).

- MCT - PERFIBESA (Perforaciones ibéricas, S.A.), (2002). “Informe referente a los sondeos P-1, P-2, P-4, P-5, P-7, P-8, P-10, P- 11, P-12, P-13, P-15, P-17 de la desaladora de Alicante”.
- MCT - PERFIBESA (Perforaciones ibéricas, S.A.), (2004). “Informe referente a los sondeos cuatro nuevos sondeos de explotación P-19, P-20, P-21 y P-22 en la desaladora de Alicante”.
- MCT-Sedelam (2005). Ampliación de la idam del canal de alicante. Estudio de impacto ambiental.
- MCT-UPCT (2008). “Estudio Hidrogeológico de las obras de captación de la Desaladora de Alicante II”.
- MCT-UPCT (2009). “estudio sobre las variaciones piezométricas y de calidad química registradas en el acuífero de agua amarga, con motivo de la puesta en marcha del túnel de la desaladora de alicante II”.
- MCT-UPCT (2010a). “Seguimiento piezométrico y de calidad química del acuífero del saladar de agua amarga en el entorno de las captaciones de las desaladoras de Alicante I y II.
- MCT-UPCT (2010b). “Seguimiento piezométrico y de calidad química del acuífero del saladar de agua amarga en el entorno de las captaciones de las desaladoras de Alicante I y II.
- MCT-UPCT (2010c). Álvarez Rogel J., González Alcaraz M. N. y Martínez Sánchez J.J. (2010c). Primer informe sobre el estudio evaluación y seguimiento de la flora y vegetación del saladar de Agua Amarga.
- MCT-UPCT (2011). “Seguimiento piezométrico y de calidad química del acuífero del saladar de agua amarga en el entorno de las captaciones de las desaladoras de Alicante I y II.
- MEA (2005). Living beyond ours means. Natural assets and human well-being. Statment from the board. Millenium Ecosystem Assesment. Island press, Washington, DC.
- Microsoft (2001): C#, .Net Framework. Microsoft Co.
- Mihaljan J. M. (1962). The rigorous exposition of the Boussinesq approximations applicable to a thin layer of fluid. Astrophysical, J. 136 1126-1133.
- Mitsch W.J. Ed. (1994). Global wetlands: old world and new. Elsevier scientific publishing Co., Amsterdam.
- Mitsch W.J., Gosselink J.G., Anderson C.J. y Zhang L. (2009). Wetlands ecosystem. Jhon Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Mitsch W.J. y Gosselink J.G. (2000). The value of wetland importance of scale and landscape setting. Ecological Economics, Volume 35, Issue 1, pp 25-33.
- Mitsch W.J. and Wang N. (2000). Large-scale coastal wetland restoration on the Laurentian Great Lakes: Determining the potential for water quality improvement. Ecological Engineering, Volume 15, Issues 3-4, pp 267-282.
- Montenat C. (1973). Les formations nerogénes et queaternaries du Levant espagnol. These d’Etat, Universite de Paris-Orsay.
- Montenac C., Ott D’estevou P. y Coppier G. (1990). Doc et Trav. I.G.A.L., 12-13, 313-368
- Mook Editor, W.G. (2001). ENVIRONMENTAL ISOTOPES in the HYDROLOGICAL CYCLE. Principles and Applications. IAEA y UNESCO.
- Narayan K. A. y Amstrong D. (1995). Simulation of groundwater interception at Lake Ranfurly, Victoria, incorporating variable density flow and solute transport. J. Hydrol. 165, 161-184.
- Nicod, J. (1972). Pays et paysages du calcaire. Ed. Presses universitaires de France, pp. 239, Paris.
- Nield D. A. y Bejan A. (1992). Convection in Porous Media. Springer-Verlag, Berlin.

- Oberbeck A. (1879). Ueber die Wärmeleitung der Flüssigkeiten bei Berücksichtigung der Strömungen infolge von Temperaturdifferenzen. *Annalen der Physik und Chemie* 7, 271-292.
- Olague N. E., Longsine D. E., Campbell, J. E. y Leigh, C. D. (1991). NEFTRAN II: User's Manual. Sandia National Laboratories, NUREG/CR-5618, Albuquerque.
- Oldenburg C. M. y Pruess K. (1995). Dispersive transport dynamics in a strongly coupled groundwater-brine flow system. *Water Res. Res.* 31, 289-302.
- Oltean C. y, Bués M. A. (2001). Coupled groundwater flow and transport in porous media. A conservative or non-conservative form. *Transp. Porous Media* 44 (2), 219-46.
- Papadakis J. (1996). *Climates of the world and their agricultural potentialities*. Edited by the author. Buenos Aires.
- Patankar S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere, New York.
- Peyret R, y Taylor T. D. (1985). *Computational methods in fluid flow*. Springer Publ., New York.
- Porta J., López Acebedo M. y Roquero C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Multiprensa. Madrid.
- PSPICE, versión 6.0 (1994): Microsim Corporation, 20 Fairbanks, Irvine, California 92718.
- Pulido Bosch A., Rodríguez Estrella T., Pulido Leboeuf P., Gisbert J., Sánchez F., Vallejos A. y García C. 2003. Integración de las aguas marinas desaladas, a través de acuíferos, en el abastecimiento de ciudades litorales del sureste español. Simposio sobre: El agua y la ciudad sostenible: Hidrogeología urbana. Public. del IGME. Serie Hidrog. y A. Subt. pp. 235-247. Barcelona.
- Raffensperger J. P. y Vlassopoulos D. (1999). The potential for free and mixed convection in sedimentary basins. *Hydrogeology, J.* 7, 505-520.
- Reilly T. E. y Goodman A. S. (1985). Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in ground water systems. A historical perspective. *J. of Hydrol.* 80, 125-160.
- Richardson C.J., Flanagan N. y Ho M. (2010). Integrated stream and wetland restoration: a watershed approach to improved water quality and community services on the landscape. *Ecol. Eng.* 37 25-39
- Rindsberger M., Margaritz M., Carmi I. y Gilat, D. (1983). The relation between air mass trajectories and the water isotopic composition in the Mediterranean sea area. *Geophysical Res. Lett.* (10) 43-46.
- Rivas-Martínez S. (1987). Mapa de las series de vegetación de España (escala 1:400.000). Publ. I.C.O.N.A., Madrid.
- Rodríguez Estrella T. (1977a). Los grandes accidentes tectónicos de la provincia de Alicante. *Tecniterrae*. nº 17. pp.1-10. Madrid.
- Rodríguez Estrella T. (1977b). Síntesis geológica del Prebético de la provincia de Alicante. II Tectónica. *Bol. Geol. y Min. de España. IGME. T.LXXXVIII-IV*. pp.273-299. Madrid.
- Rodríguez Estrella T. (1977c). Síntesis geológica del Prebético de la provincia de Alicante. I Estratigrafía. *Bol. Geol. y Min. de España. IGME. T.LXXXVIII-III*. pp.183-214. Madrid.
- Rodríguez Estrella T. (1979). Geología e hidrogeología del sector de Alcaraz-Liótor-Yeste (prov. de Albacete). Síntesis geológica de la zona Prebética. Tesis doctoral. Universidad de Granada-IGME.

- Rodríguez Estrella T. (2005). Decisive influence of neotectonics on the water connection between the Mediterranean Sea, Mar Menor and the Campo de Cartagena aquifers (South-east of Spain). pp. 745-758. Capítulo del Libro: Grounwater and saline intrusion. Selected papers from the 18 th Sal Water Intrusion Meeting (SWIM). Cartagena 2004 Edited by: L. Araguás, E. Custodio and M. Manzano. Publicaciones del IGME. serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 15.
- Rodríguez Estrella T. (2007). La captación de acuíferos costeros para abastecimiento a plantas desaladoras. Capítulo del libro: Los acuíferos costeros: Retos y soluciones (TIAC, 07, Almería). Publicaciones del IGME. Editores: Pulido, López Geta y Ramos. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas, nº 23. 2 V. pp.959-979. Madrid.
- Rodríguez Estrella T., López Lima B. y Mora Cuenca V. (1992). Existencia de un Neokarst cuaternario en las proximidades del aeropuerto de Alicante. V Simp. de Hidrog. pp. 207-209. Alicante.
- Rodríguez Estrella T., Martínez A., García D. y Lupiani E. (2008). La captación de agua marina de la desalinizador de Alicante II: un desafío tecnológico consecuencia del respeto al medio ambiente. IX Simposio de Hidrogeología, Elche. AEH-MCI-IGME, 713-725.
- Sánchez J.M., Izco J. y Medrano M. (1996). Relationships between vegetation zonation and altitude in a salt-marsh system in northwest Spain. *Journal of Vegetation Science* (7):695-702.
- Sanjuame E. (1985). Las costas valencianas. Seimentología y morfología. Univ. Valencia.
- Scheidegger A. E. (1961). General theory of dispersion in porous media. *J. Geophys. Res.* 66, 3273-3278.
- Segol G. (1994). *Classic Groundwater Simulations Proving and Improving Numerical Models*. Prentice-Hall, Old Tappan, N. J. 531 p.
- Sender R.K. y Fogg G. E. (1990). Stream functions and equivalent freshwater heads for modelling regional flow of variable-density groundwater. *Review of theory and verification, Water Res. Res.* 26 (9), 2089-2096.
- SEAWAT, ver Langevin, Barclay y Guo (2003).
- Simenstad Ch., Reed D. y Ford M. (2006). When is restoration not?: Incorporating landscape-scale processes to restore self-sustaining ecosystems in coastal wetland restoration. *Ecological Engineering*, Volume 26, Issue 1, pp 27-39.
- Simmons C. T., Narayan K. y Wooding R. A. (1999a). On a test case for density-dependent flow and solute transport models: the salt lake problem. *Water Res. Res.* 35, pp. 3607–3620.
- Simmons C. T., Sharp Jr. J. M., y Robinson N. I. (1999b). Density-driven free convection in zones of inverted salinity through fractured low-permeability units in the Gulf of Mexico Basin, Texas. In *Water 99 Joint Congress: 25th Hydrology and Water Resources Symposium, 2nd Int. Conference on Water Resources and Environment Research: Handbook and Proceedings*, 739-744.
- Soria J.M., Alfaro P., Fernández J. y Viseras C. (2001). Quantitative subsidence-uplift analysis of the Bajo Segura Basin (eastern Betic Cordillera): tectonic control on the stratigraphic architecture. *Sedim. Geol.* 140, 271-289.
- Soto Meca A., Alhama F. y González-Fernández C. F. (2007a). An efficient model for solving density driven groundwater flow problems based on the network simulation method. *J. Hidrol.*, 339, 39-53.

- Soto Meca A., Alhama I. y Alhama F. (2007a). Numerical simulation of salt water intrusion with velocity dependent dispersion coefficient by network method. TIAC'07, III Int. Symp. On Tech. of Sea Water Intrusion into Coastal Aquifers. Almeria. Serie: Hidrología y Aguas Subterráneas, nº 23. Inst. Geológico y Minero (2007), p. 491-500.
- Soto A., Alhama F. y González-Fernández C.F. (2006a). Transient simulation of a real 2-D aquifer by network method. First Int. Joint Salt Water Intrusion Conference, 1st SWIM-SWICA. Proceedings p.22. Cagliari, Italia.
- Soto Meca A., Alhama F y González Fernández C. F. (2006b). Numerical solution of salt-dome by network method. IASME/WSEAS Int. Conference on Water Resources Hydraulics and Hydrology, Chalkida, Greece.
- Stuyfzand P. J. (1989). An accurate relatively simple calculation of the saturation index of calcite for fresh to saltwater. J. of Hydrol. 105, 95-107.
- SUTRA, ver Voss (1984)
- Tibbals C. H. (1990). Hydrology of the Florida aquifer system in east-central Florida. U. S. Geological Survey, Prof. Paper 1403-E, 98 p.
- Turner R.K., Van Den Bergh J.C.J.M., Söderquist T., Barendregt A., Van Der Straaten J., Maltby E. y Van Ireland E.C. (2000). Ecological-economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy. Ecol. Econ. 35, 7-23.
- Vera J.A. (2004). Geología de España. Editorial Pral. Madrid. SGE, MEC e IGME.
- Voss C. I. (1984). SUTRA. A FE simulation for saturated-unsaturated, Fluid—Density-Dependent Groundwater Flow with Energy Transport or Chemically-Reactive Single-Species Solute Transport, U.S. Geological Survey. Water Resources Invest. Rep. 84-4369. 409.
- Vymazal J. (2010). Enhancing ecosystem service on the landscape with created, constructed and restored wetlands. Ecol. Eng. Doi: 10.1016/J. Ecol. Eng. 07.031.
- Whigham D. F. (1999). Ecological issues related to wetland reservation, restoration, creation and assessment. The Science of The Total Environment, Volume 240, Issues 1-3, 31-40.
- Williams, P.W. (1972) Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. Bull. of the Geological Society of America, 83, pp. 761-796.
- Wooding R. A., Tyler S. W. y White I. (1997). Convection in groundwater below an evaporating salt lake: 1. Onset of instability, Water Res. Res. 33, 6, 1199-1217.
- Yeh G. T. (1981). On the computation of Darcian velocity and mass balance in the finite element modelling of groundwater flow. Water Res. Res. 17, 1529-1534.
- Yusa Y. y Oishi I. (1989). Theoretical study of two-phase flow through porous medium (II), J. of the Geothermal Research Society of Japan. 11 (3) 217-237.
- Zedler J.B. (1996). Tidal wetland restoration: a scientific perspective and Southern California focus. University of California.
- Zedler J.B. y Kercher S. (2005). Wetland resources : status, trends, ecosystem service, and restorability. Annu Rev. Environ Resour. 30, 39-74.

Zedler J.B. y Callaway J.C. (2000). Evaluating the progress of engineered tidal wetland. *Ecological Engineering*, Volume 15, Issues 3-4, 211-225.

Zheng C. y Bennett G. D. (1995). *Applied contaminant transport modelling*. Van Norstrand Reinhold, New York.

PÁGINAS Y DIRECCIONES WEB:

<http://www.aemet.es>

<http://www.chj.es>

<http://www.chj.gob.es/redescalidad>

<http://www.IAEA.org>

<http://www.igme.es>

<http://www.medioambiente.ladipu.com> ('Senderos de la sal')

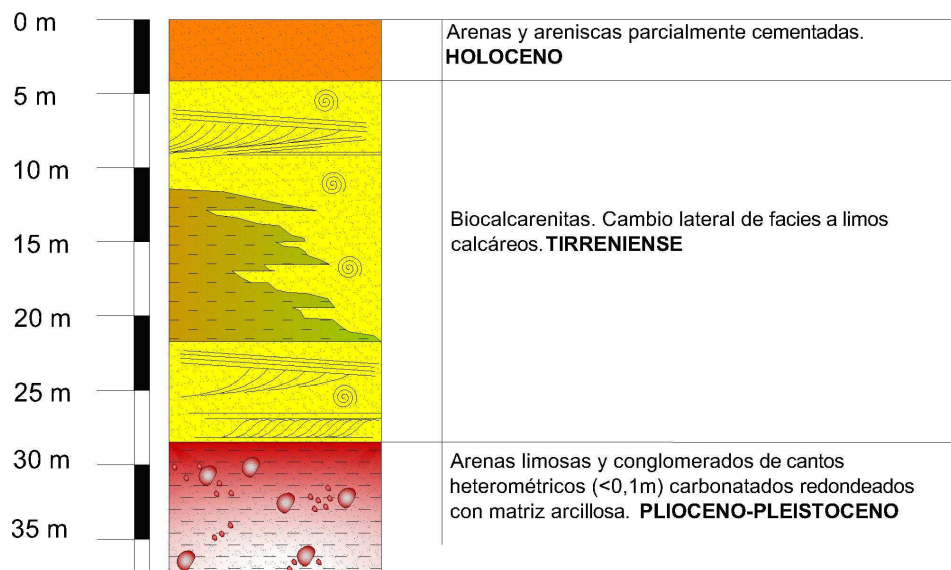
<http://www.sig.mapa.es>

http://www.tutiempo.net/clima/Alicante_El_Altet

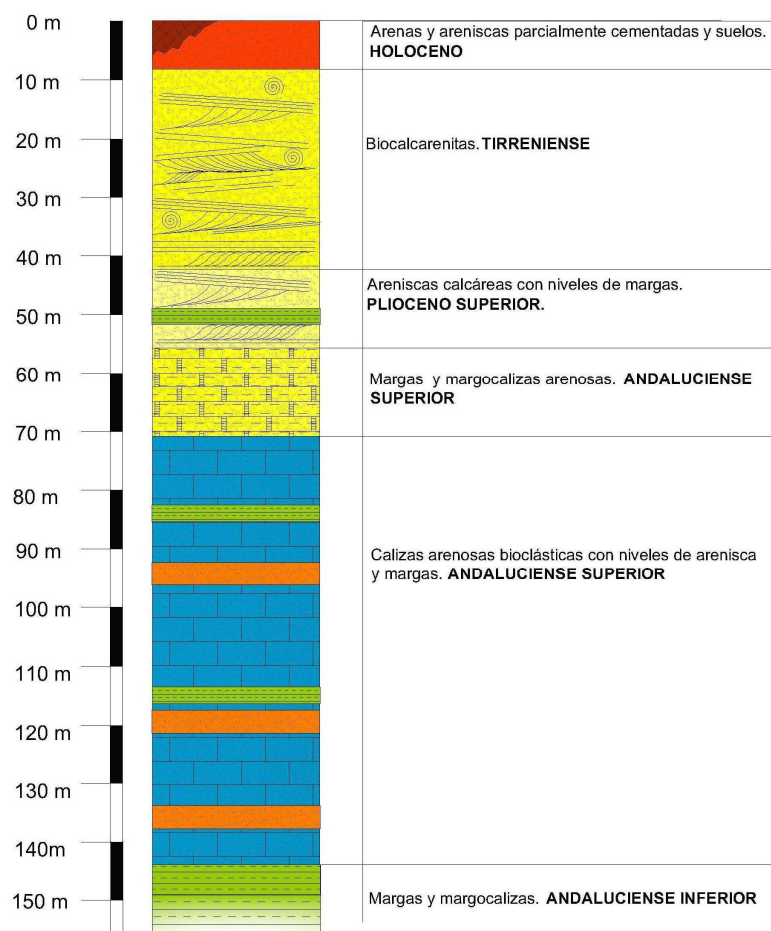
<http://www.waterloohydrogeologic.com>

ANEXO 1

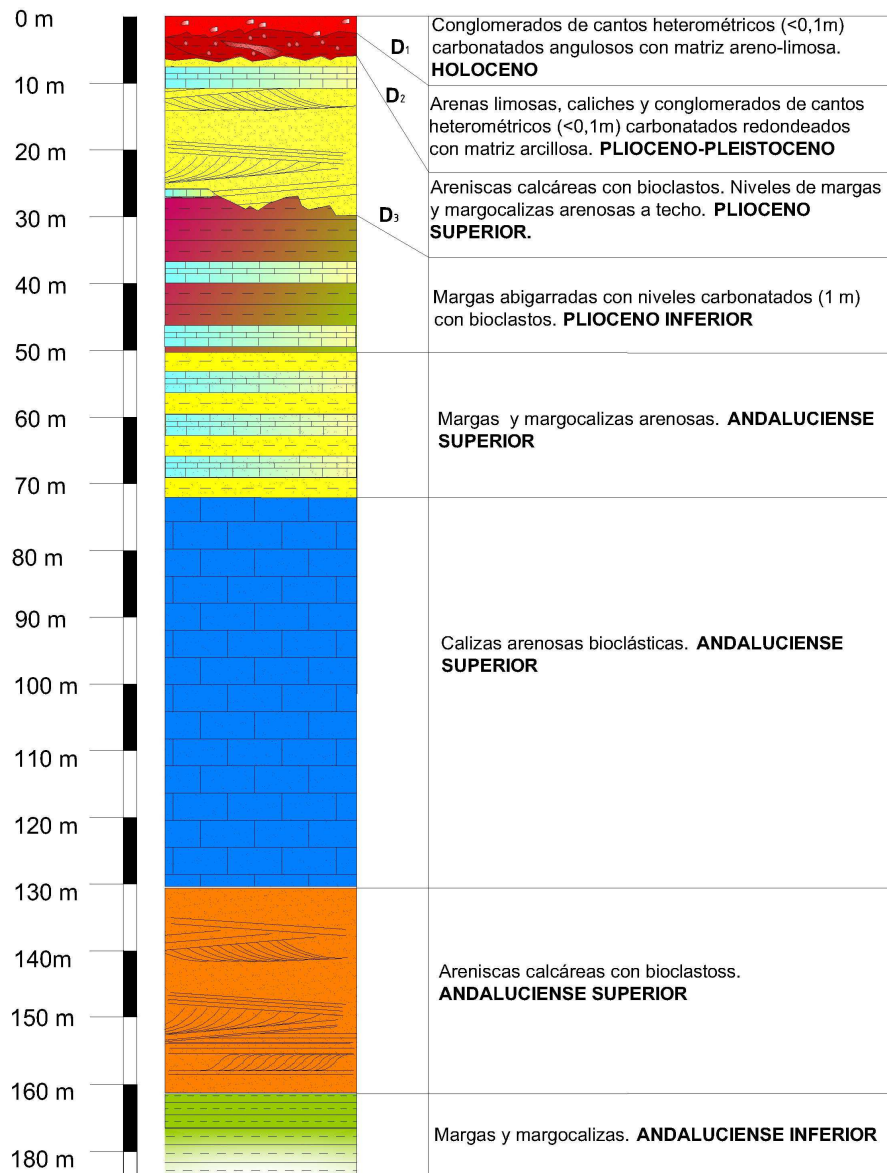
COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS



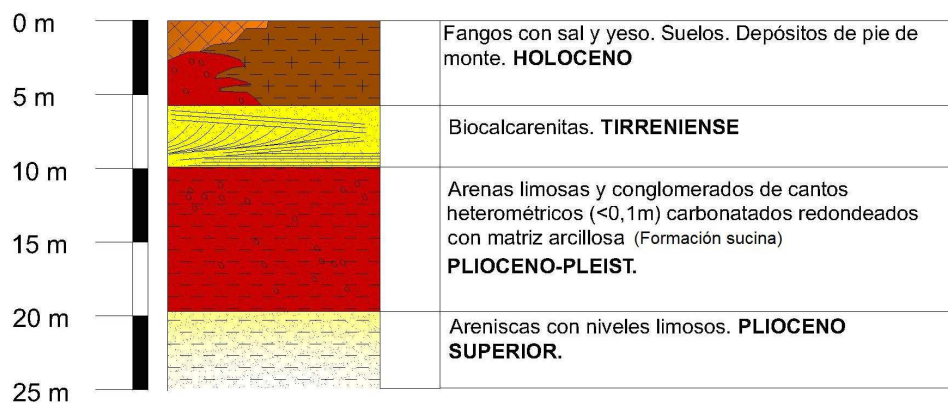
Columna estratigráfica en la Playa del Saladar



Columna estratigráfica en Cala Calabarda



Columna estratigráfica Sierra del Colmenar



Columna estratigráfica del Saladar

ANEXO 2

**COORDENADAS DE POZOS, SONDEOS Y
PIEZÓMETROS**

Código	X	Y	Z
P1	717044.97	4242312.71	3.049
P2	717049.02	4242331.92	3.137
P3	717052.361	4242353.29	3.396
P4*	717058.159	4242374.12	3.275
P5	717062.007	4242394.76	3.439
P6	717066.463	4242415.21	3.436
P7	717070.706	4242436.07	3.811
P8	717074.77	4242456.77	3.656
P9	717078.649	4242477.42	3.149
P10	717082.067	4242490.8	3.616
P11	717085.042	4242504.09	4.25
P12*	717088.476	4242517.61	4.49
P13	717090.967	4242535.33	4.228
P14	717095.857	4242549.72	4.795
P15	717098.531	4242563.57	4.553
P16	717102.125	4242579.33	4.574
P17	717105.777	4242593.04	4.499
P18*	717108.317	4242606.38	4.434
P19	717057.42	4242450.31	4.324
P20	717072.95	4242550.18	6.091
P21	717082.15	4242571.59	5.261
P22	717087.373	4242587.39	5.379
P23	717106.989	4242658.91	5.497
P24	717116.077	4242699.62	4.351
P25	717118.491	4242737.5	5.86
P26	717029.694	4242405.61	5.269
P27	717023.96	4242383.94	5.761
P28	717016.986	4242361.51	6.245
P29	717011.495	4242340.74	6.027
P30	717001.212	4242316.65	5.876
P31	717045.512	4242460.72	4.442
P32	717060.375	4242532.39	6.621
P33	717094.998	4242611.85	5.406

* piezómetro

Coordenadas de pozos de la DA-I

Código	X	Y	Z
P-1	7 1 6 6 6 3, 8 1 5 0	4 2 4 1 1 3 5, 6 4 9	0, 9 8 2
P-2	7 1 6 1 6 6, 0 6 7 0	4 2 4 1 1 4 7, 6 7 8	1, 8 0 0
P-3	7 1 5 7 3 7, 9 5 3 0	4 2 4 1 0 6 2, 9 4 5	1, 9 5 4
P-4	7 1 5 4 2 6, 1 5 9 0	4 2 4 1 0 6 4, 1 4 9	4, 5 4 2
P-5	7 1 5 8 6 8, 1 3 3 0	4 2 4 1 7 4 6, 5 4 4	2, 5 6 1
P-6	7 1 6 2 0 7, 8 5 5 0	4 2 3 9 9 5 0, 7 4 5	1, 8 5 2
P-7	7 1 6 8 3 6, 5 9 3 0	4 2 4 1 0 1 1, 7 6 6	2, 9 6 7
P-8	7 1 6 4 4 3, 0 0 0 0	4 2 4 1 2 5 0, 0 0 0	0, 2 9 2
D-2	7 1 6 8 2 9, 0 9 7	4 2 4 1 9 3 6, 1 4 7	0, 7 5 8
P-9	7 1 6 9 6 5, 7 1 5	4 2 4 1 8 6 7, 4 4 0	1, 4 1 3
P-10	7 1 6 9 7 3, 4 2 6 0	4 2 4 1 7 6 1, 3 6 6	2, 1 9 1
P-11	7 1 6 9 6 5, 5 9 1 0	4 2 4 1 6 3 9, 9 8 4	1, 9 2 2
P-12	7 1 6 9 6 4, 8 8 9 0	4 2 4 1 5 2 7, 7 3 3	1, 5 6 3
P-13	7 1 6 9 7 0, 2 3 8 0	4 2 4 1 4 2 3, 3 9 2	1, 8 6 0
P-14	7 1 6 9 5 5, 5 0 5 0	4 2 4 1 3 0 0, 1 1 8	1, 9 5 4
P-15	7 1 6 9 5 3, 6 6 2 0	4 2 4 1 2 1 7, 2 1 6	1, 8 9 7
P-16	7 1 6 9 7 0, 7 4 0 0	4 2 4 1 1 4 0, 3 2 9	2, 2 4 9
P-17	716399,45	4242324,71	10,068
P-18	715850,43	4242119,32	11,305
P-19	715295,23	4241740,81	8,935
P-20	716647,5	4239997,55	3,407
P-21	715640,2	4240154,37	3,464
I-3	717,032,834	4,242,129,924	2,505
DI-4	717,058,159	4,242,374,117	3,275
DI-2	717,088,476	4,242,517,612	4,49
DI-18	717,108,317	4,242,606,382	4,434
P-30	715100,2	4241450,3	13,920
P-31	713650,4	4241375	30,341

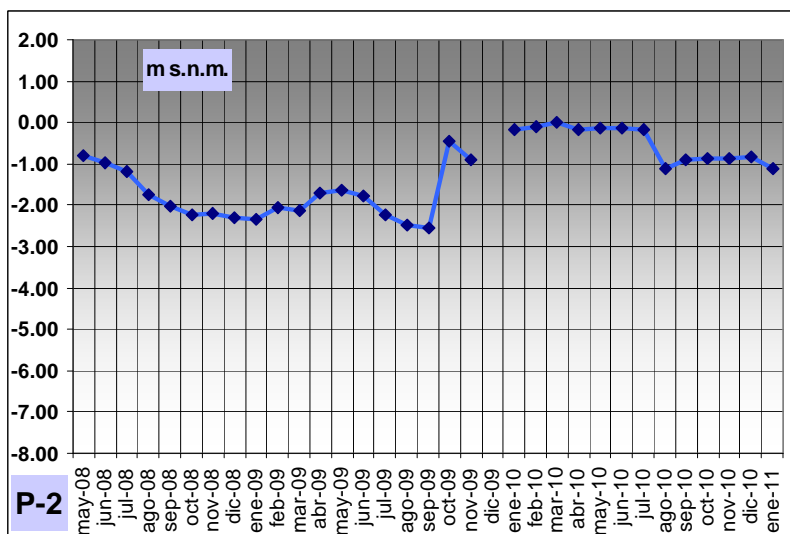
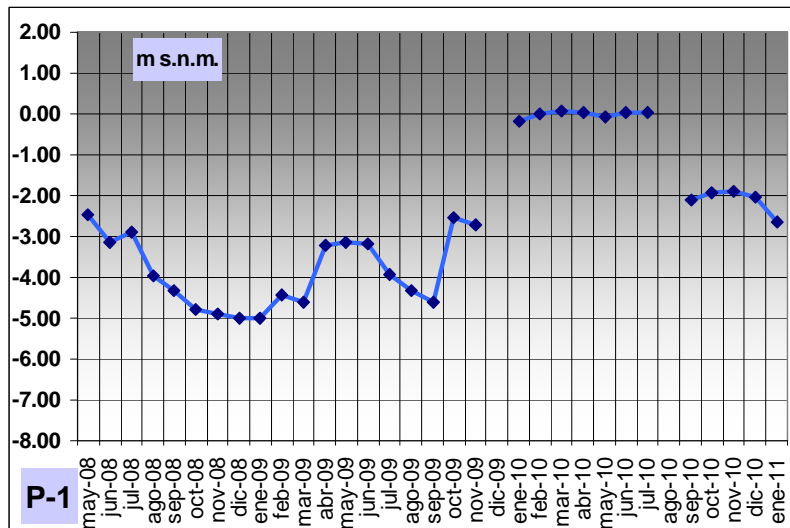
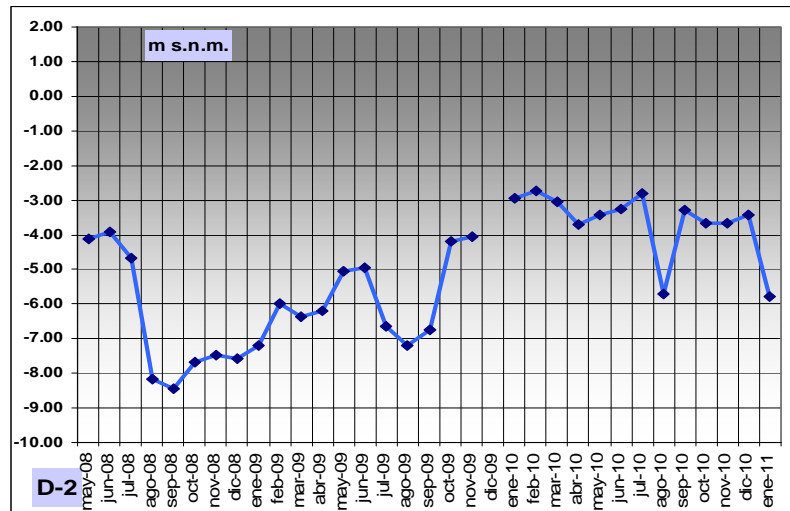
Red de control de piezómetros DA-II y DA-I

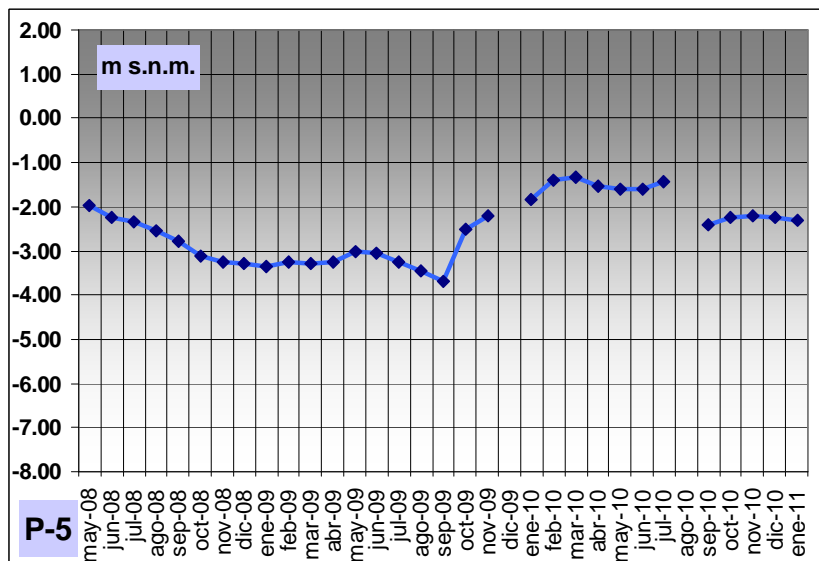
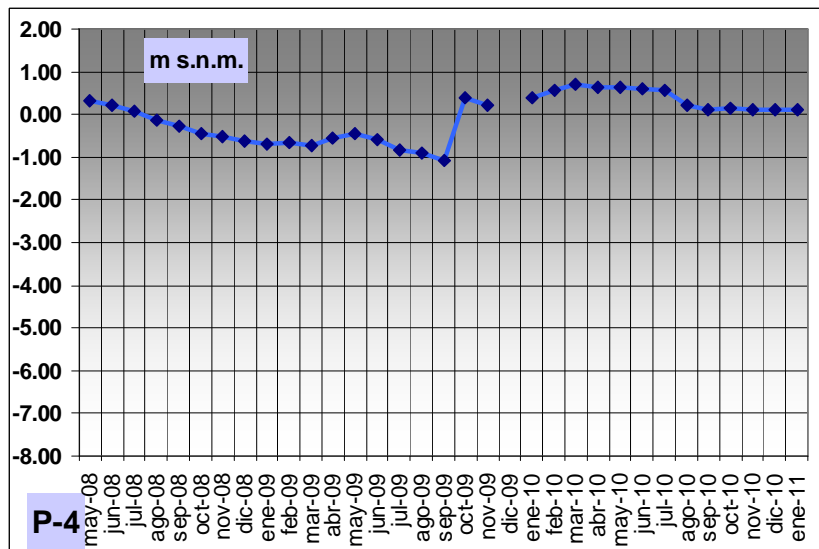
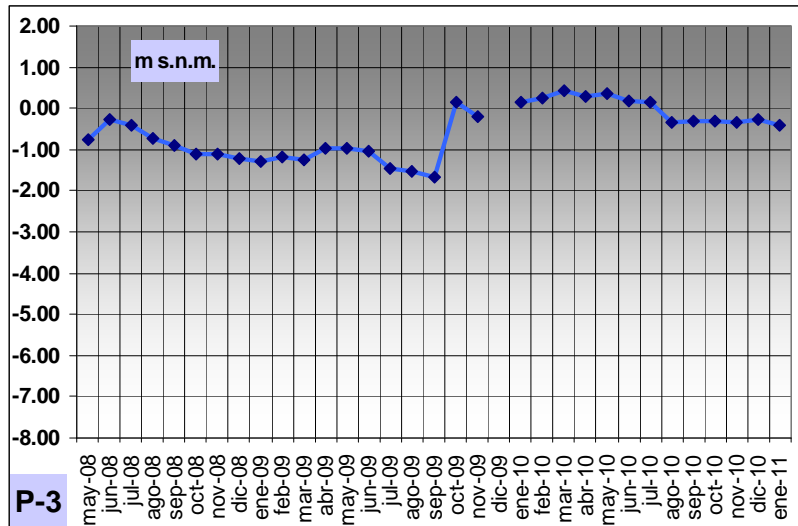
Código	X	Y	Z
SONDEO 1	717039.217	4242204.36	2.374
SONDEO 2	717042.653	4242199.06	2.341
SONDEO 3	717032.834	4242129.92	2.505
SONDEO 4	717037.894	4242165.19	1.883
S-1	695301	4234192	
S-2	695431	4235220	
S-3	695730	4234220	
S-4	695845	4234216	
S-5	696079	4234214	
S-6	696344	4234199	
S-7	697567	4234288	
S-8	697956	4234288	
S-9	698480	4234310	
S-10	699475	4234483	
S-11	699012	4233948	
S-12	700726	4233575	
D-1	649882	4234254	
D-2	695281	4234026	
D-3	695986	4233590	

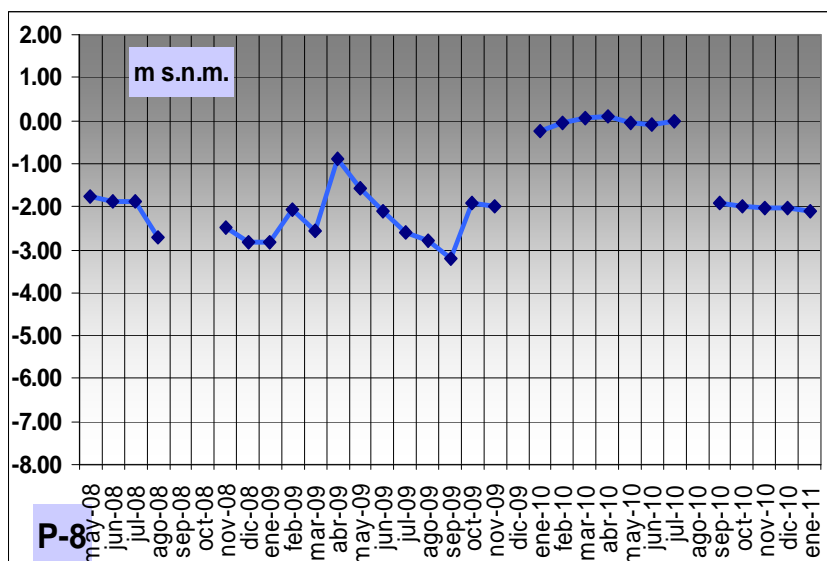
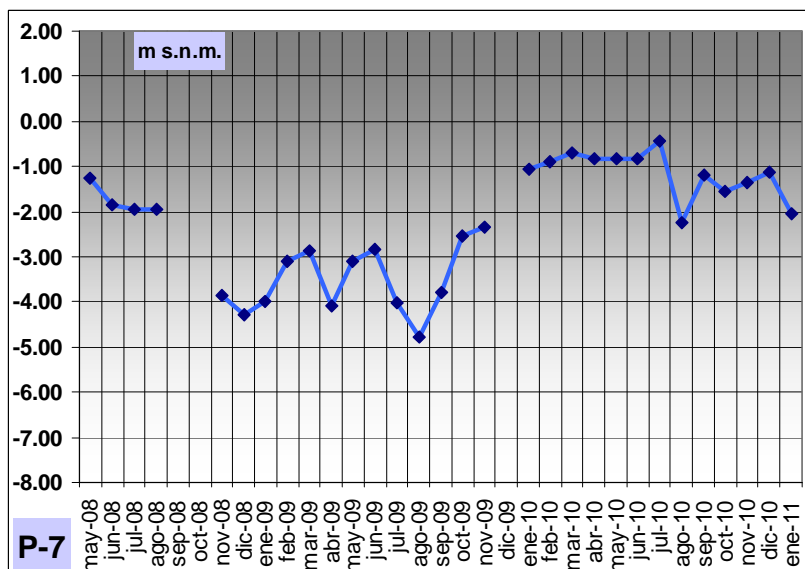
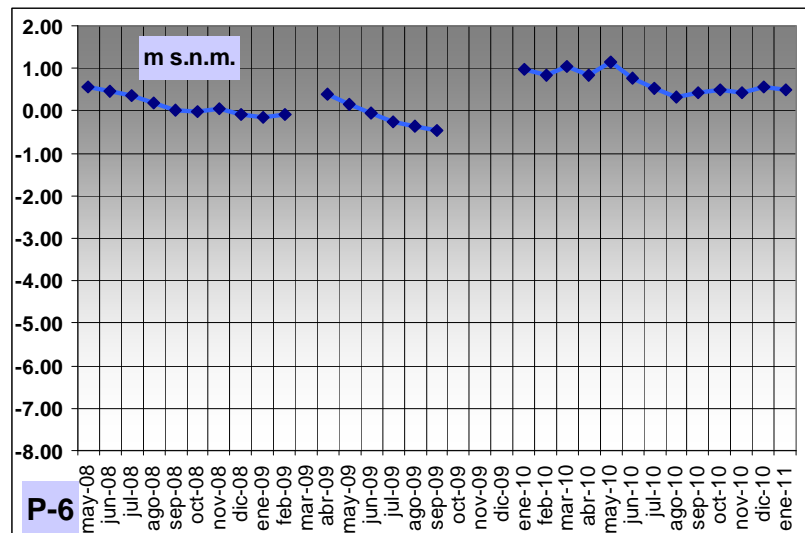
Sondeos de investigación

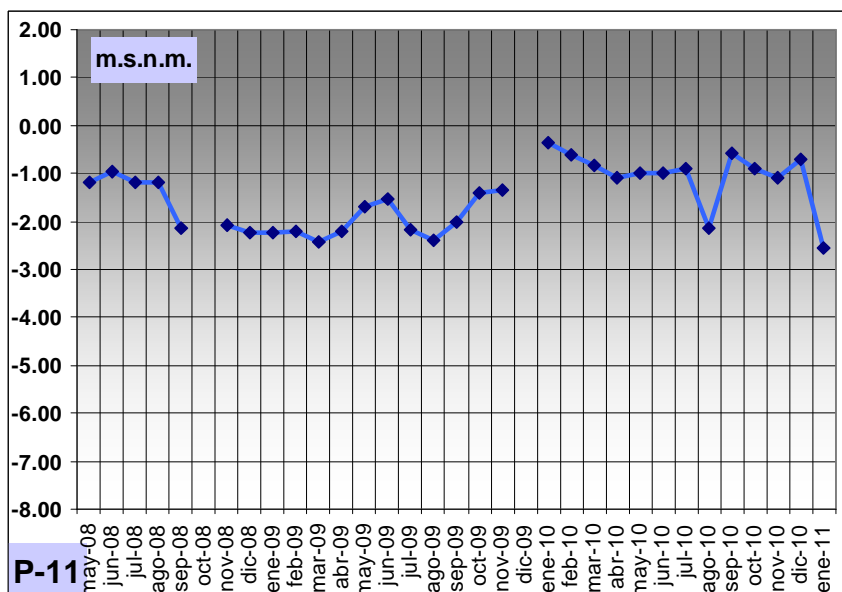
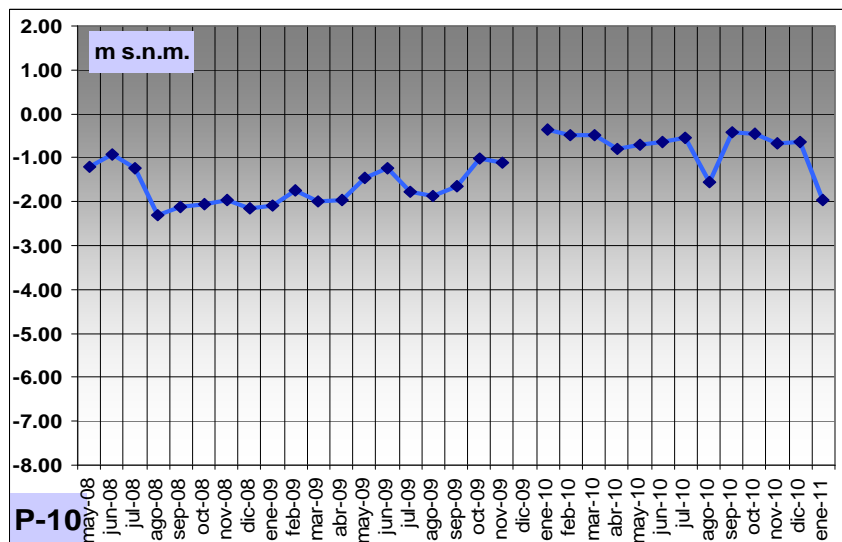
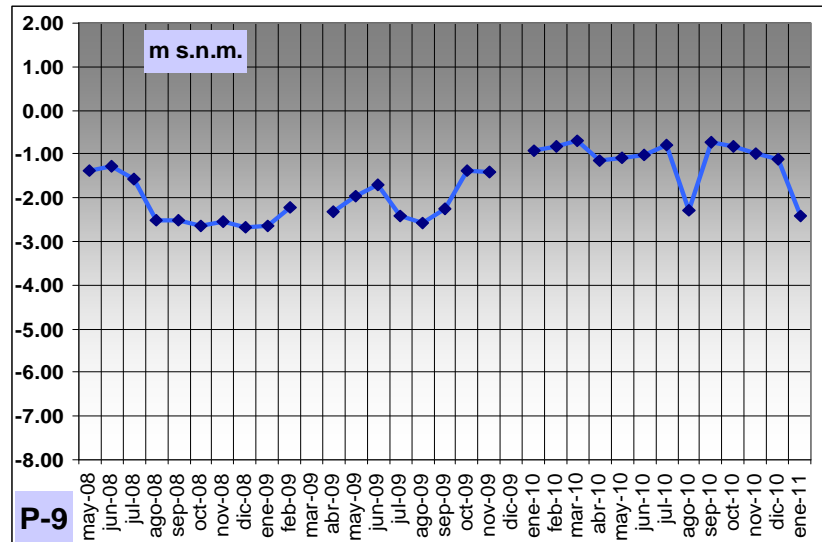
ANEXO 3

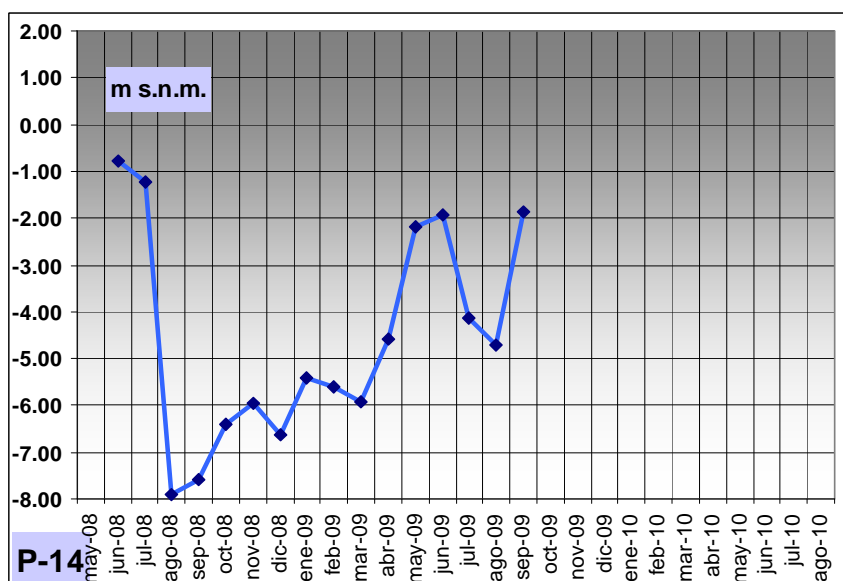
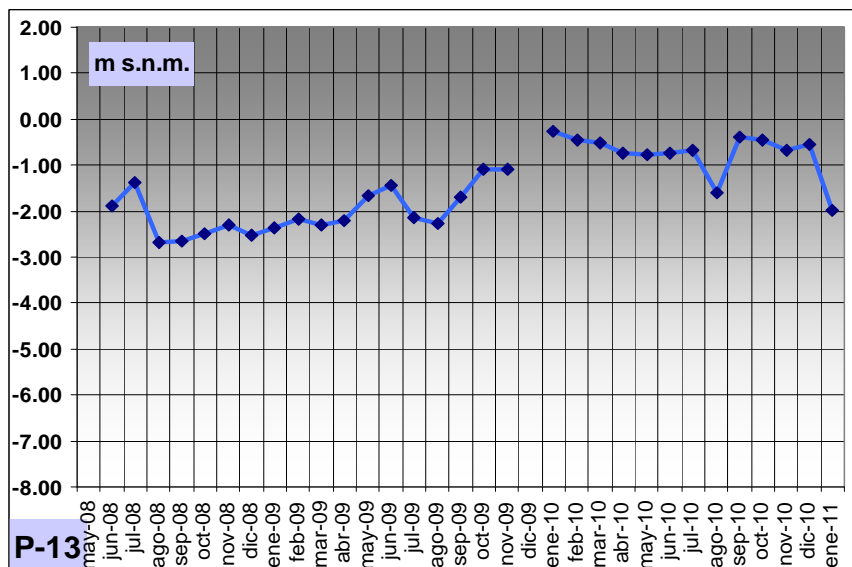
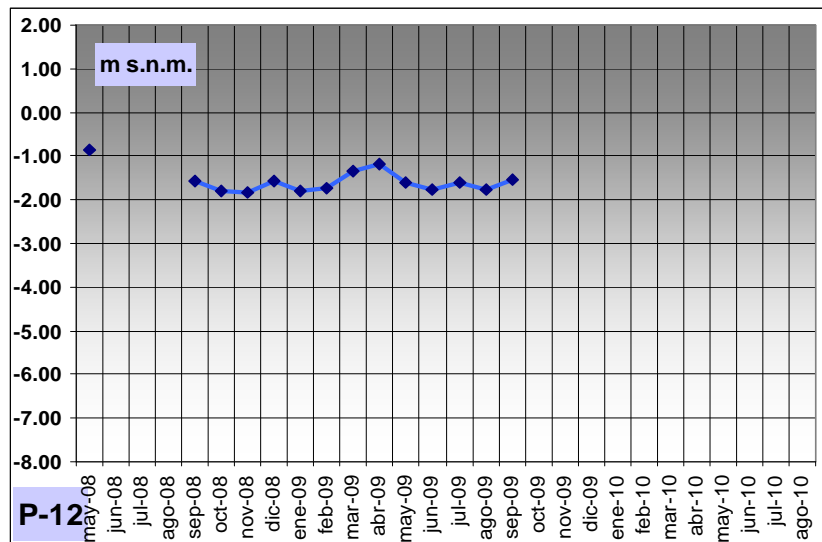
EVOLUCIONES PIEZOMÉTRICAS

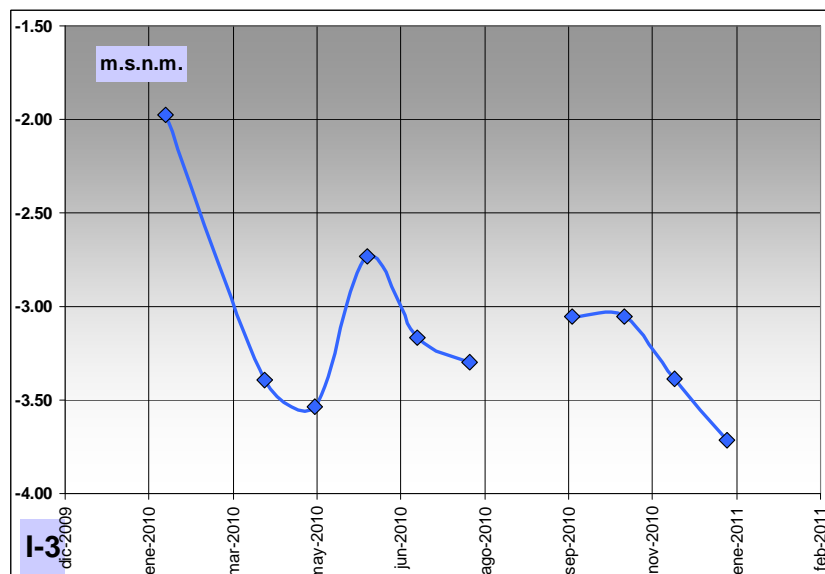
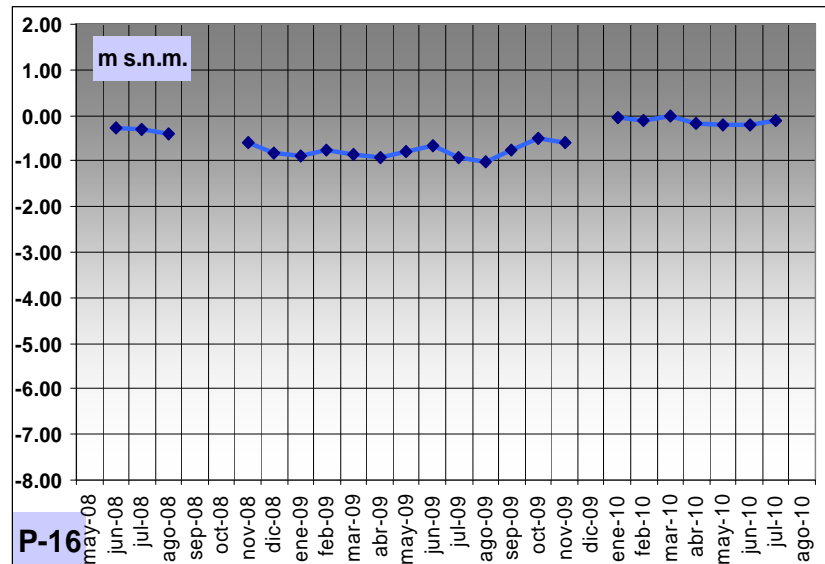
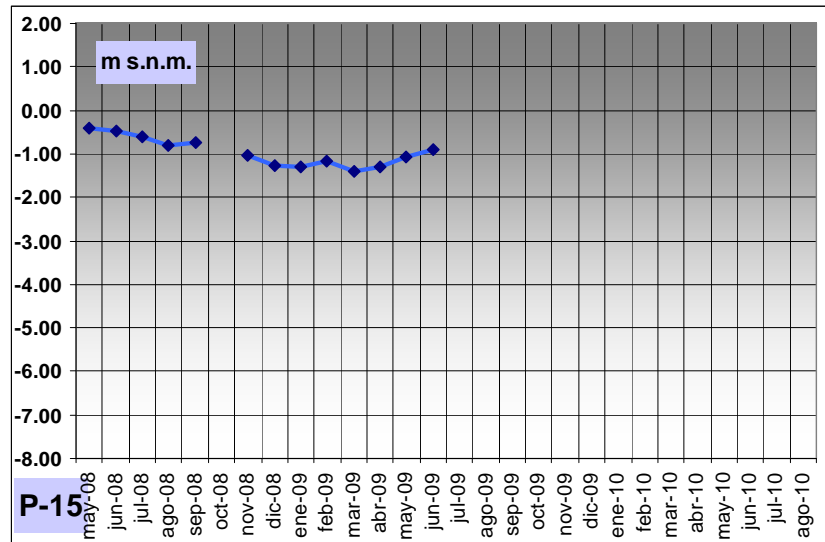


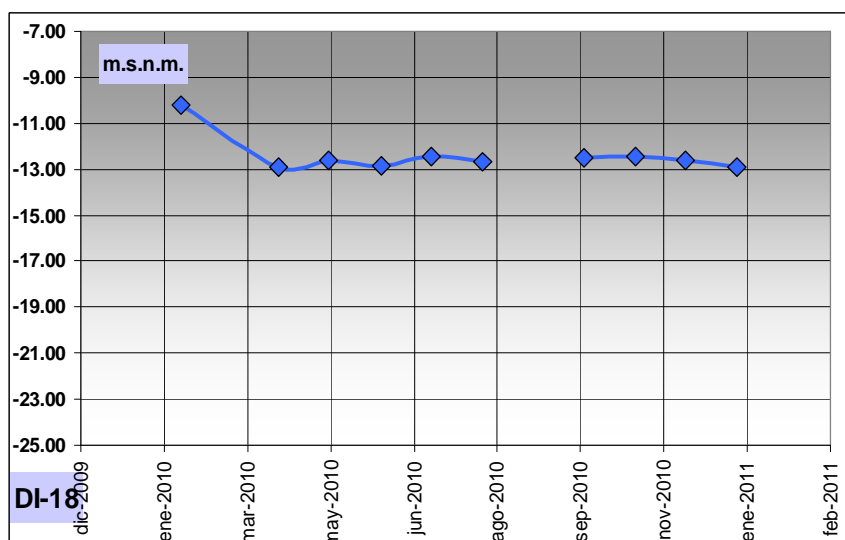
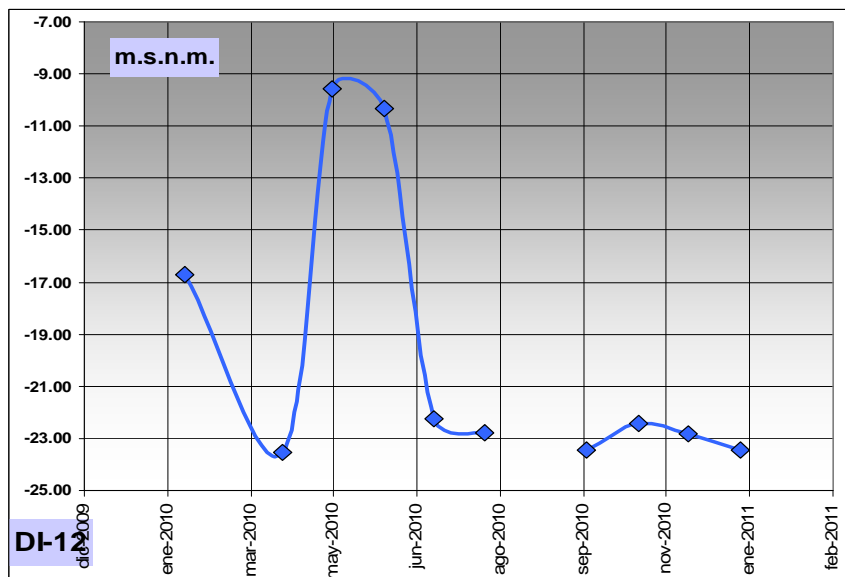
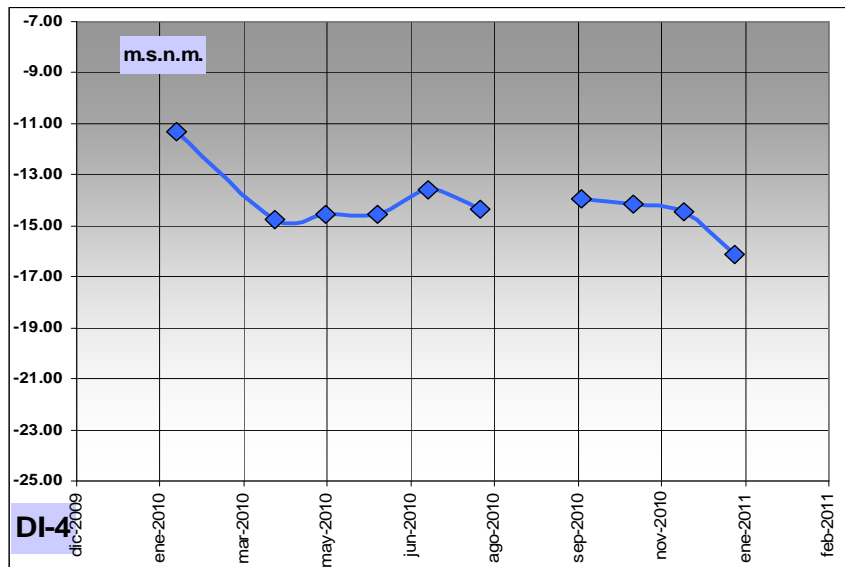


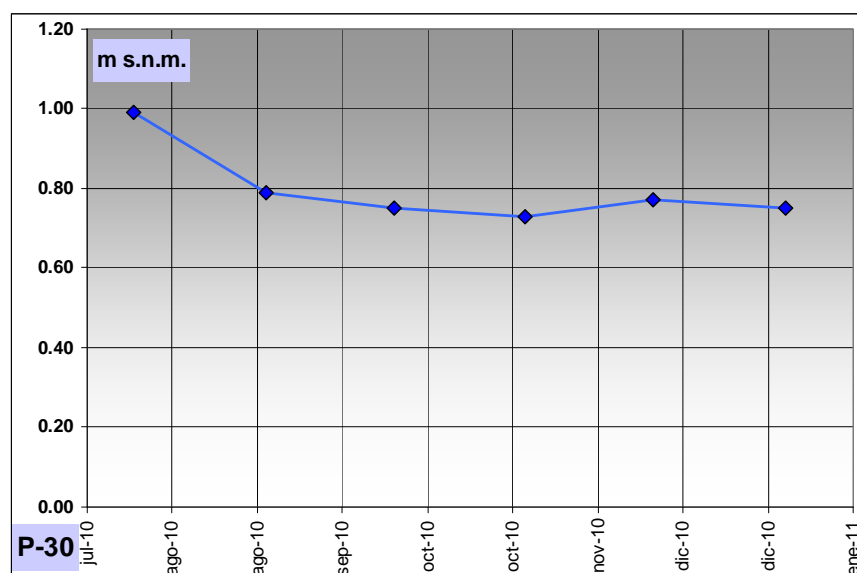
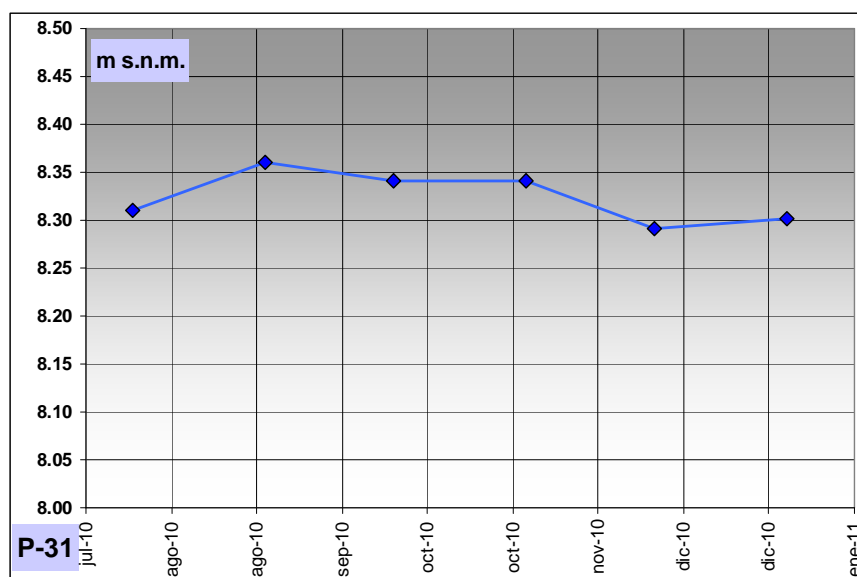












ANEXO 4

VARIACIONES DE LA PIEZOMETRÍA CON LA PROFUNDIDAD ASOCIADAS A CAMBIOS DE CONCENTRACIÓN (DEDUCIDOS A PARTIR DE MEDIDAS DE C.E.), Y ERRORES RELATIVOS

Profundidad (m)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 25°)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°)	Concentración (mg/l)	Nivel piezométrico (m)	Diferencia respecto columna de agua dulce (m)	Error relativo (%)
5	6543	5889	2,94	1,00	0,00	0,29
6	8423	7581	3,79	2,01	0,01	0,34
7	8707	7836	3,91	3,01	0,01	0,35
8	11400	10260	5,13	4,02	0,02	0,39
9	13700	12330	6,16	5,02	0,02	0,44
10	14100	12690	6,34	6,03	0,03	0,47
11	15100	13590	6,79	7,04	0,04	0,50
12	15200	13680	6,84	8,04	0,04	0,52
13	15200	13680	6,84	9,05	0,05	0,54
14	15200	13680	6,84	10,06	0,06	0,55
15	15200	13680	6,84	11,06	0,06	0,56
16	15300	13770	6,88	12,07	0,07	0,57
17	15300	13770	6,88	13,08	0,08	0,58

Piezómetro P-4

Profundidad (m)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 25°)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°)	Concentración (mg/l)	Nivel piezométrico (m)	Diferencia respecto columna de agua dulce (m)	Error relativo (%)
1	11400	10260	5,13	1,01	0,01	0,51
2	20900	18810	9,40	2,01	0,01	0,72
3	20900	18810	9,40	3,02	0,02	0,79
4	20900	18810	9,40	4,03	0,03	0,83
5	21300	19170	9,58	5,04	0,04	0,85
6	21100	18990	9,49	6,05	0,05	0,87
7	21100	18990	9,49	7,06	0,06	0,88
8	21100	18990	9,49	8,07	0,07	0,88
9	21100	18990	9,49	9,08	0,08	0,89
10	21000	18900	9,45	10,09	0,09	0,90
11	21000	18900	9,45	11,10	0,10	0,90
12	21000	18900	9,45	12,11	0,11	0,90
13	21000	18900	9,45	13,12	0,12	0,90
14	21900	19710	9,85	14,13	0,13	0,91
15	26900	24210	12,10	15,14	0,14	0,93
16	29800	26820	13,41	16,15	0,15	0,95
17	35500	31950	15,97	17,17	0,17	0,99
18	39500	35550	17,77	18,19	0,19	1,03
19	40600	36540	18,27	19,21	0,21	1,07
20	41600	37440	18,72	20,22	0,22	1,11

Piezómetro P-2

Profundidad (m)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$, 25°)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$, 20°)	Concentración (mg/l)	Nivel piezométrico (m)	Diferencia respecto columna de agua dulce (m)	Error relativo (%)
4	57200	51480	25,74	1,03	0,03	2,51
5	64400	57960	28,98	2,05	0,05	2,66
6	64300	57870	28,93	3,08	0,08	2,71
7	64300	57870	28,93	4,11	0,11	2,74
8	64600	58140	29,07	5,14	0,14	2,75
9	64600	58140	29,07	6,17	0,17	2,77
10	64900	58410	29,20	7,20	0,20	2,78
11	65300	58770	29,38	8,23	0,23	2,79
12	65400	58860	29,43	9,26	0,26	2,79
13	65400	58860	29,43	10,29	0,29	2,80
14	65600	59040	29,52	11,32	0,32	2,81
15	65600	59040	29,52	12,35	0,35	2,81
16	65600	59040	29,52	13,38	0,38	2,82
17	65700	59130	29,56	14,41	0,41	2,82
18	65700	59130	29,56	15,44	0,44	2,82
19	65700	59130	29,56	16,47	0,47	2,83
20	65700	59130	29,56	17,49	0,49	2,83
21	65700	59130	29,56	18,52	0,52	2,83
22	65700	59130	29,56	19,55	0,55	2,83
23	65700	59130	29,56	20,58	0,58	2,84
24	65700	59130	29,56	21,61	0,61	2,84
25	65700	59130	29,56	22,64	0,64	2,84
26	71700	64530	32,26	23,68	0,68	2,85
27	76800	69120	34,56	24,71	0,71	2,87
28	79700	71730	35,86	25,75	0,75	2,90
29	85400	76860	38,43	26,78	0,78	2,93
30	89200	80280	40,14	27,82	0,82	2,96

Piezómetro D-2

Profundidad (m)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$, 25°)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$, 20°)	Concentración (mg/l)	Nivel piezométrico (m)	Diferencia respecto columna de agua dulce (m)	Error relativo (%)
1	99000	89100	44,55	1,04	0,04	4,26
2	199000	179100	89,55	2,13	0,13	6,28
3	233000	209700	104,85	3,24	0,24	7,38
4	312000	280800	140,40	4,38	0,38	8,66
5	310900	279810	139,90	5,52	0,52	9,41
6	310900	279810	139,90	6,66	0,66	9,90
7	310900	279810	139,90	7,80	0,80	10,25
8	310900	279810	139,90	8,94	0,94	10,50
9	310900	279810	139,90	10,08	1,08	10,70
10	310900	279810	139,90	11,22	1,22	10,86
11	310900	279810	139,90	12,36	1,36	10,99
12	310900	279810	139,90	13,50	1,50	11,10
13	310900	279810	139,90	14,64	1,64	11,19
14	310900	279810	139,90	15,78	1,78	11,27
15	310500	279450	139,72	16,92	1,92	11,34
16	310500	279450	139,72	18,06	2,06	11,40

Piezómetro P-8

ANEXO 5

ANÁLISIS QUÍMICOS EN POZOS DE LA DA-I, D URANTE LA FASE DE INVESTIGACIÓN PREVIA A LA PUESTA EN MARCHA DE LA DESALADORA

Denominación	Total de sólidos disueltos mg/l	HCO ₃ ⁻ Mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ Mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	caudal	tiempo
M-1	66.008,00	201,4	36.478,1	4.366,0	1,4	20.240,4	3.286,6	790,4	643,9	20	60
M-2	77.306,67	177,0	44.383,4	4.272	1,8	25.384,0	320,6	2.704	63,5	40	120
M-3	74.230,70	170,9	41.618,3	4.236	1,2	23.380	3.354,7	809,9	659,8	60	195
M-4	73.563,36	158,6	41.299,3	4.274	1,1	23.046	3.330,6	809,9	643,9	110	795
M-5	73.682,56	158,6	41.334,7	4.248,0	1,1	22.979,2	3.495	822	643,9	110	855
M-6	66.715,67	177,0	38.108,79	4.133,8	1	21.108,8	357,1	2.764,9	65,1	110	1440
Mar	44.446,40	152,5	24.708,70	2.859	1,1	13.694	1.735,5	770,9	524,6		

Análisis químicos realizados a muestras tomados durante el ensayo de bombeo en el sondeo de investigación 3 (piezómetro I-3). La muestra M-6 se toma tras un parón de 10 horas, justo antes de volver a bombear

Denominación	Fecha de toma	Caudal (l/s)	Tiempo de bombeo (minutos)	Nivel dinámico (m)	Total de sólidos disueltos mg/l	Cond. 20 °C mS/cm	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	rCl/rHCO ₃
M-1	14:00 (7/08/01)	25	60	5.75	30,52	39,80	272,1	16.500,2	10.688	104,69
M-2	15:00 (7/08/01)	50	120	8.49	32,72	41.50	270,9	17.902,3	11,356	113,72
M-3	17:00 (7/08/01)	80	240	14.27	36,56	47,50	272,1	20.667,3	12.024	130,69
M-4	21:00 (7/08/01)	100	480	21.20	40,87	51,60	266	22.829,8	14.028	147,68
M-5	9:00 (8/08/01)	100	1200	21.76	44,35	52,30	259,9	25.240,4	12.692	167,10
M-6	12:00 (8/08/01)	105	1380	23.05	43,68	53,10	277	24.602,3	12.692	152,83

Análisis químicos realizados a las muestras tomados durante el ensayo de bombeo en el pozo-3 (P-3)

MUESTRAS TOMADAS EN EL SONDEO P-1

DENOMINACIÓN	DÍA	HORA	CAUDAL (l/s)	NIVEL DINÁMICO (m)	Cond. µS/cm 20 °C	TSD (g/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
P-1 M-1	20/08/01	13:15	100	23,45	52.600	44,40	25.027,7	2.573	274,6	6,4	12.962	1.021,4	2.404,8	405,4
P-1 M-2	20/08/01	22:00	100	24,75	52.600	43,91	24.460,5	2.702	283,1	4,9	12.692	1.021,4	2.324,6	429,2
P-1 M-3	21/08/01	10:00	100	25,12	54.100	43,61	24.744,1	2.493	273,4	9,2	12.692	1.471,4	1.523	413,3
P-1 M-4	21/08/01	22:00	100	25,38	55.300	45,37	25.878,5	2.266	275,8	7,2	13.694	1.213,6	1.607,2	429,2
P-1 M-5	22/08/01	10:00	100	25,60	55.200	45,26	25.665,8	2.364	270,9	9,4	13.360	985	2.204,4	405,4
P-1 M-6	23/08/01	16:00	100	25,92	55.600	45,63	25.736,7	2.501	272,1	7,9	13.894,4	1009,3	1.803,6	413,3
P-1 M-7	24/08/01	15:45	100	35,89	56.400	45,16	25.524	2.474	280,7	7,8	13.226,4	1.045,8	2.204,4	405,4
P-1 M-8	25/08/01	15:00	80	18,89	55.000	45,67	25.878,5	2.437	278,2	8,5	13.827,6	1.118,7	1.723,4	405,4

MUESTRAS TOMADAS EN EL SONDEO P-2

DENOMINACIÓN	DÍA	HORA	CAUDAL (l/s)	NIVEL DINÁMICO (m)	Cond. µS/cm 20 °C	TSD (g/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
P-2 M-1	20/08/01	13:15	100	9,98	55.200	44,348	25.240,4	2.255	302,7	10,4	13.360	875,5	2.264,5	39,7
P-2 M-2	20/08/01	22:00	100	11,49	56.200	46,807	26.800,2	2.255	299	8,1	14.028	1.240,3	1.763,5	413,3
P-2 M-3	21/08/01	10:00	100	11,93	56.900	47,229	26.658	2.430	277	8,4	14.161	595,8	2.685,4	413,3
P-2 M-4	21/08/01	22:00	100	13,02	57.700	48,076	27.367,4	2.531	289,2	7,2	14.295	1.361,9	1.803,6	421,3
P-2 M-5	22/08/01	10:00	100	13,34	57.600	47,477	26.942	2.469	280,7	6,5	14.028	972,8	2.364,7	413,3
P-2 M-6	23/08/01	16:00	100	13,52	57.800	45,954	26.091,2	2.665	283,1	6,1	13.827	1.665,9	1.010	405,4
P-2 M-7	24/08/01	15:45	120	19,01	57.800	47,572	26.800,2	2.932	277	4,5	14.428	1.610	1.114,2	405,4
P-2 M-8	25/08/01	15:00	80	11,7	56.900	45,804	25.914,0	2.802	285,6	6,9	13.760	1.687,8	965,9	381,5

Análisis químicos realizados a las muestras tomadas durante el ensayo de bombeo simultáneo en los pozos P-1 y P-2.

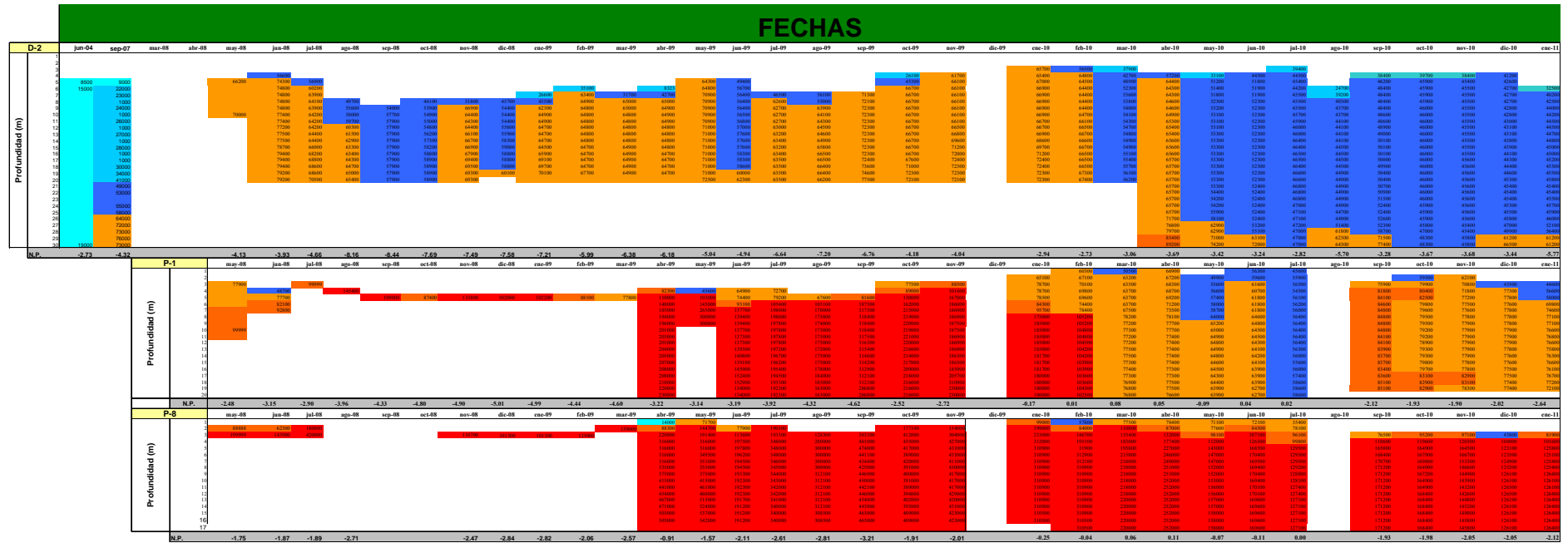
Sondeo	Muestra	Caudal (l/s)	Día	Hora	Tiempo acumulado del bombeo (minutos)	Conductividad 20°C (microS/cm)	Total de sólidos disueltos (g/l)	Cloruros (mg/l)	Sulfatos (mg/l)	Bicarbonatos (mg/l)	Sodio (mg/l)	Bario (mg/l)	Estroncio (mg/l)	Cobre (mg/l)
P-17	M-1	80	4/06/02	8:30	720	53.900	38,56	21.776,30	3.144,00	240,41	10.942,90			
P-17	M-2	110	5/06/02	19:10	2820	54.500	37,33	21.270,00	3.192,00	286,79	9.655,50	0,0722	27,300	0,118
P-15	M-1	100	25/06/02	19:30	720	55.400	41,05	23.397,00	3.156,00	245,30	11.586,60			
P-15	M-2	123	8/06/02	6:00	2820	55.500	38,50	21.411,80	3.561,00	289,23	10.299,20	0,0507	27,360	0,142
P-13	M-1	100	11/06/02	4:00	720	52.600	37,08	21.270,00	2.898,00	234,31	10.299,20			
P-13	M-2	120	12/06/02	15:00	2820	52.300	37,40	21.776,30	2.910,00	286,79	9.655,50	0,0464	27,490	0,114
P-12	M-1	80	13/06/02	7:00	720	52.100	39,63	22.971,60	3.003,00	248,96	10.942,90			
P-12	M-2	80	14/06/02	18:00	2820	60.300	43,90	25.736,70	2.997,00	285,57	11.586,60	0,0714	28,910	0,138
P-11	M-1	108	17/06/02	21:00	720	60.200	42,37	23.113,40	3.459,00	223,33	12.874,00			
P-11	M-2	120	19/06/02	7:00	2820	58.400	43,12	24.247,80	3.173,00	283,13	12.230,00	0,0630	27,270	0,116
P-10	M-1	100	20/06/02	5:00	720	60.400	43,59	24.318,70	3.556,00	228,21	12.874,00			
P-10	M-2	120	21/06/02	16:00	2880	59.900	43,94	24.744,10	3.384,00	286,79	12.230,00	0,0654	25,400	0,085
P-8	M-1	100	25/06/02	4:30	720	61.800	45,19	25.594,90	3.558,00	229,43	12.874,00			
P-8	M-2	125	26/06/02	11:30	2820	61.700	42,55	23.751,50	3.773,00	273,37	11.586,60	0,0769	24,780	0,108
P-7	M-1	100	28/06/02	11:00	720	58.500	42,06	23.680,60	3.260,00	246,52	12.230,30			
P-7	M-2	120	29/06/02	18:00	2820	58.500	42,65	24.318,70	3.332,00	269,70	11.586,60	0,0956	26,350	0,080
P-5	M-1	60	3/07/02	0:15	720	53.000	38,18	21.766,30	3.213,00	246,52	10.299,20			
P-5	M-2	60	4/07/02	16:00	2880	55.000	41,66	23.467,90	3.426,00	275,81	11.586,60	0,0640	26,870	0,085
P-4	M-1	55	5/07/02	3:00	720	50.900	37,10	21.340,90	2.781,00	252,62	10.299,20			
P-4	M-2	52	6/07/02	14:00	2880	53.100	40,35	23.609,70	2.798,00	272,14	10.942,90	0,0862	25,360	0,093
P-2	M-1	65	9/07/02	2:00	720	54.200	40,77	23.538,80	3.319,00	244,08	10.942,90			
P-2	M-2	65	10/07/02	13:30	2880	53.500	40,65	22.829,80	3.210,00	259,94	11.586,60	0,0948	26,110	0,142
P-1	M-1	55	11/07/02	1:30	720	56.400	42,02	23.751,50	3.423,00	251,40	11.586,60			
P-1	M-2	50	12/07/02	13:00	2880	55.200	45,02	25.311,30	3.875,00	258,72	12.230,30	0,0853	21,830	0,087

Análisis químicos realizados a las muestras tomadas durante el ensayo de bombeo en los pozos P-1, P-2, P-4, P-5, P-7, P-8, P-10, P-11, P-12, P-15 y P-17

ANEXO 6

REGISTROS MENSUALES DE EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN PROFUNDIDAD

Anexos

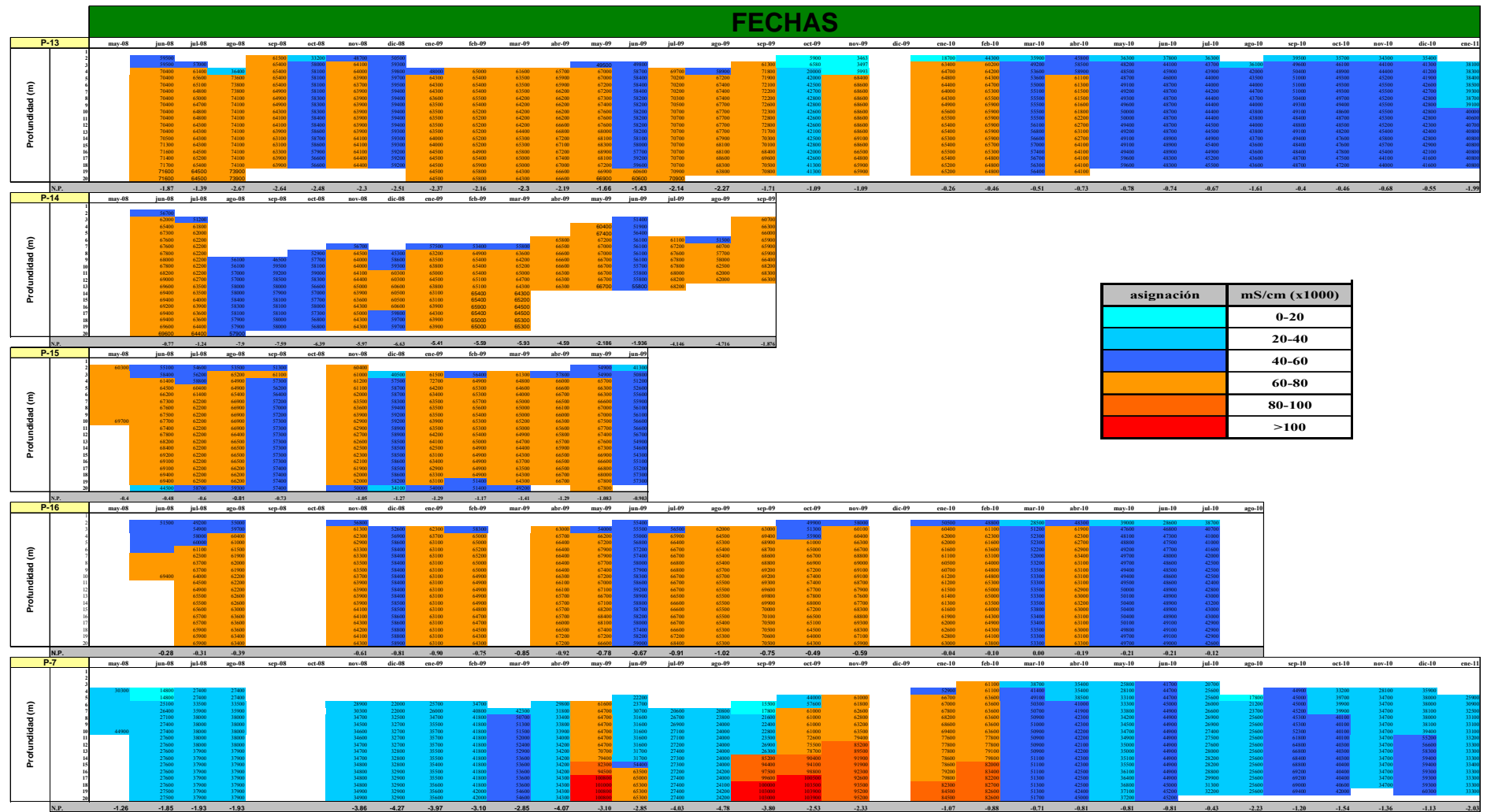


Piezómetros en el saladar

Anexos

FECHAS																																					
P-9		may-08	jun-08	jul-08	ago-08	sep-08	oct-08	nov-08	dic-08	ene-09	feb-09	mar-09	abr-09	may-09	jun-09	jul-09	ago-09	sep-09	oct-09	nov-09	dic-09	ene-10	feb-10	mar-10	abr-10	may-10	jun-10	jul-10	ago-10	sep-10	oct-10	nov-10	dic-10	ene-11			
Profundidad (m)	1	7892	3251	6511	3510	3510																															
	2	6124	561	6511	9510	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100			
	3	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100		
	4	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	5	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	6	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	7	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	8	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	9	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	10	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	11	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	
	12	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	13	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	14	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	15	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	16	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	17	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	18	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	19	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	20	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	
N.P.		-1.38	-1.29	-1.57	-2.51	-2.51	-2.66	-2.55	-2.48	-2.64	-2.33	-2.33	-1.95	-1.71	-2.41	-2.39	-2.24	-1.37	-1.41	-1.41	-0.92	-0.92	-0.70	-0.70	-1.15	-1.09	-1.03	-0.79	-2.27	-0.72	-0.82	-0.99	-1.12	-2.41			
P-10		may-08	jun-08	jul-08	ago-08	sep-08	oct-08	nov-08	dic-08	ene-09	feb-09	mar-09	abr-09	may-09	jun-09	jul-09	ago-09	sep-09	oct-09	nov-09	dic-09	ene-10	feb-10	mar-10	abr-10	may-10	jun-10	jul-10	ago-10	sep-10	oct-10	nov-10	dic-10	ene-11			
Profundidad (m)	1	7892	3251	6511	3510	3510																															
	2	6124	561	6511	9510	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100	12100			
	3	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100	42100		
	4	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	5	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	6	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	
	7	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	8	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	9	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	10	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100		
	11	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	62100	
	12	62																																			

Anexos



Piezómetros en la línea de costa (II)

FECHAS

Piezómetros en los alrededores del saladar

[illegible]

Piezómetros junto a la DA-I (pozos en desuso)

ANEXO 7

ANÁLISIS QUÍMICOS

Anexos

Fecha Muestra	1. Lluvia	mar-10 2. Senieta	mar-10 3. Pozo senieta	mar-10 4. Rambla Amarga	2010 5. Vinalopó-Elche
CE uS/cm	512.00				19555.00
pH	7.00				
TAC					
DUR			3076.16	2299.76	
TSD		7333.34	9894.23	6290.19	
aniones	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
HCO3-	21.00	4.79	344.85	409.51	483.05
SO4=	21.50	1801.39	3202.27	1940.46	1665.50
Cl-	40.00	2909.39	3073.80	1828.08	6637.00
NO3-	0.00	0.16	0.66	145.97	
sum aniones	82.5	4715.73	6621.58	4324.02	8785.55
cationes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Na+	9.00	1908.11	2232.67	1207.25	4221.40
K+	0.80	39.41	31.38	25.28	62.10
Ca++	14.00	342.40	629.61	377.82	640.12
Mg++	10.00	286.41	365.17	329.37	222.10
sum cationes	33.8	2576.33	3258.83	1939.72	5145.72
NH4+	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Cl-+NO3-	0.68	5	0.35	0.35	0.35
Na+ + K+	40	2909.55	3074.46	1974.05	6637
	9.8	1947.52	2264.05	1232.53	4283.5
aniones (meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
HCO3-	0.34	0.08	5.65	6.71	7.92
SO4=	0.45	37.53	66.71	40.43	34.70
Cl-	1.13	81.95	86.59	51.50	186.96
NO3-	0.00	0.00	0.01	2.35	0.00
Cl-+NO3-	1.13	81.96	86.60	53.85	186.96
sum aniones	1.92	119.56	158.96	100.99	229.57
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	0.41	83.97	97.88	53.14	185.13
Na+	0.39	82.96	97.07	52.49	183.54
K+	0.02	1.01	0.80	0.65	1.59
Ca++	0.70	17.12	31.48	18.89	32.01
Mg++	0.83	23.67	30.18	27.22	18.36
sum cationes	1.94	124.76	159.54	99.25	235.49
aniones(%)	%	%	%	%	%
HCO3-	17.94	0.07	3.56	6.65	3.45
SO4=	23.34	31.39	41.97	40.03	15.11
Cl-	58.72	68.54	54.47	50.99	81.44
NO3-	0.00	0.00	0.01	2.33	0.00
Cl-+NO3-	58.72	68.55	54.48	53.32	81.44
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
cations(%)	%	%	%	%	%
Na+ + K+	21.24	67.30	61.35	53.54	78.61
Na+	20.19	66.50	60.85	52.89	77.94
K+	1.06	0.81	0.50	0.65	0.67
Ca++	36.12	13.72	19.73	19.03	13.59
Mg++	42.64	18.97	18.92	27.43	7.79
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Relaciones iónicas					
rNa/rK	19.13	82.31	120.95	81.18	115.56
rMg/rCa	1.18	1.38	0.96	1.44	0.57
rSO4/rCl	0.40	0.46	0.77	0.79	0.19
rCl/rHCO3	3.27	1043.68	15.32	7.67	23.61
icb	0.63	-0.02	-0.13	-0.03	0.01
Error (%)	2.93	4.25	0.36	-1.74	2.54
$icb = (rCl - (rNa + rK)) / rCl$ $kr = (rCa * (rHCO3)^2)^{(1/3)}$ $Error(\%) = 200 * (rCat - rAn) / (rCat + rAn)$					

Anexos

Fecha Muestra	jun-08 6. DA-II 08	mar-10 7. DA-II 10	2008 8. Promedio DA-I	jul-07 9. DA-II 3	nov-07 10. DA-II túnel
CE uS/cm	60500	56900.00	60000.00	57400.00	55400.00
pH	7.50	7.85		7.40	5.98
TAC					
DUR			743.00	8730.42	
TSD	50256	42600	42000.00	39262.25	42697.00
aniones	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
HCO3-	215.10	168.00	182.20	228.96	203.00
SO4=	3997.00	3215.10	3300.00	3543.20	3332.00
Cl-	26780.00	24813.00	23426.00	21532.93	23809.00
NO3-	0.30	1.78		0.00	1.35
sum aniones	30992.4	28197.88	26908.2	25305.09	27345.35
cationes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Na+	13530.00	13279.50	13249.00	11093.43	12533.50
K+	503.00	449.00	449.10	450.00	471.50
Ca++	689.00	555.68	651.40	705.54	568.06
Mg++	1900.00	1566.45	1418.60	1692.25	1499.34
sum cationes	16622	15850.63	15768.1	13941.22	15072.4
NH4+	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Cl-+NO3-	26780.3	24814.78	23426	21532.93	23810.35
Na+ + K+	14033	13728.5	13698.1	11543.43	13005
aniones (meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
HCO3-	3.53	2.75	2.99	3.75	3.33
SO4=	83.27	66.98	68.75	73.82	69.42
Cl-	754.37	698.96	659.89	606.56	670.68
NO3-	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02
Cl-+NO3-	754.37	698.99	659.89	606.56	670.70
sum aniones	841.17	768.72	731.62	684.13	743.44
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	601.13	588.85	587.53	493.83	556.99
Na+	588.26	577.37	576.04	482.32	544.93
K+	12.86	11.48	11.49	11.51	12.06
Ca++	34.45	27.78	32.57	35.28	28.40
Mg++	157.02	129.46	117.24	139.86	123.91
sum cationes	792.60	746.10	737.34	668.96	709.31
aniones(%)	%	%	%	%	%
HCO3-	0.42	0.36	0.41	0.55	0.45
SO4=	9.90	8.71	9.40	10.79	9.34
Cl-	89.68	90.92	90.19	88.66	90.21
NO3-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl-+NO3-	89.68	90.93	90.19	88.66	90.22
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
cations(%)	%	%	%	%	%
Na+ + K+	75.84	78.92	79.68	73.82	78.53
Na+	74.22	77.39	78.12	72.10	76.83
K+	1.62	1.54	1.56	1.72	1.70
Ca++	4.35	3.72	4.42	5.27	4.00
Mg++	19.81	17.35	15.90	20.91	17.47
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Relaciones iónicas					
rNa/rK	45.73	50.28	50.15	41.91	45.19
rMg/rCa	4.56	4.66	3.60	3.96	4.36
rSO4/rCl	0.11	0.10	0.10	0.12	0.10
rCl/rHCO3	213.93	253.79	220.93	161.60	201.53
icb	0.20	0.16	0.11	0.19	0.17
Error (%)	-5.95	-2.99	0.78	-2.24	-4.70
$icb = (rCl - (rNa + rK)) / rCl$ $kr = (rCa * (rHCO3)^2)^{(1/3)}$ $Error(\%) = 200 * (rCat - rAn) / (rCat + rAn)$					

Anexos

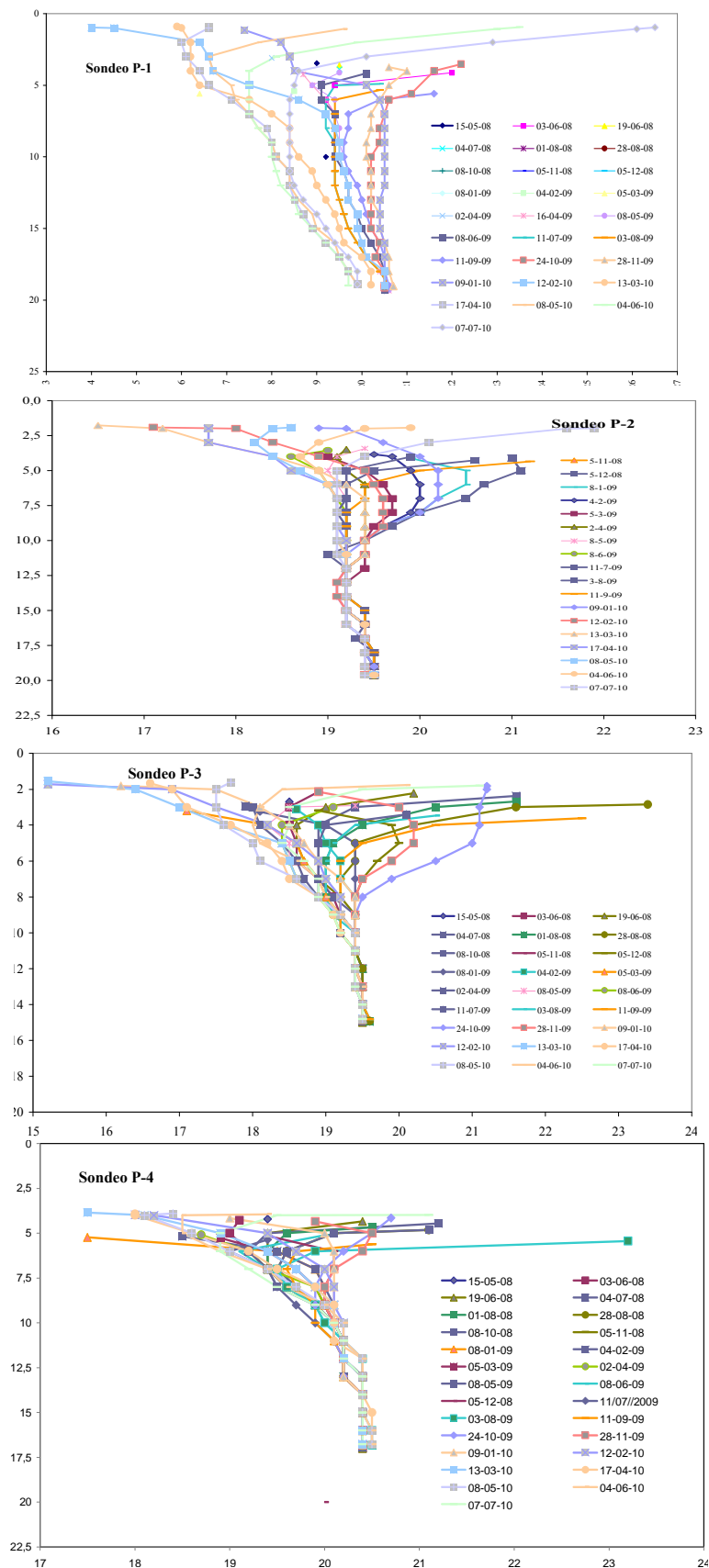
Fecha Muestra	jun-10 11. Mar	dic-00 12. P-150 m	ago-01 13. P-50 A	ago-01 14. P-50 B	jun-08 15. D-2 08
CE uS/cm	56000.00		55600.00	57700.00	51500.00
pH					7.35
TAC					
DUR					6926.17
TSD	44446.40	74000.00	45000.00	48000.00	39125.34
aniones	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
HCO3-	152.50	170.00	272.10	302.70	141.20
SO4=	2859.00	4200.00	2501.00	2531.00	3421.30
Cl-	24708.00	41300.00	25736.70	27367.00	21778.89
NO3-	1.10	1.20	7.90	7.20	13.81
sum aniones	27720.6	45671.2	28517.7	30207.9	25355.2
cationes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Na+	13694.00	23000.00	13894.00	14295.00	11287.35
K+	65.10	650.00	413.30	421.30	586.49
Ca++	1735.50	3350.00	1803.60	1803.60	515.51
Mg++	770.90	810.00	1009.30	1361.00	1369.34
sum cationes	16265.5	27810	17120.2	17880.9	13758.69
NH4+	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Cl-+NO3-	24709.1	41301.2	25744.6	27374.2	21792.7
Na+ + K+	13759.1	23650	14307.3	14716.3	11873.84
aniones (meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
HCO3-	2.50	2.79	4.46	4.96	2.31
SO4=	59.56	87.50	52.10	52.73	71.28
Cl-	696.00	1163.38	724.98	770.90	613.49
NO3-	0.02	0.02	0.13	0.12	0.22
Cl-+NO3-	696.02	1163.40	725.10	771.02	613.71
sum aniones	758.08	1253.69	781.67	828.71	687.30
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	597.06	1016.62	614.66	632.30	505.75
Na+	595.39	1000.00	604.09	621.52	490.75
K+	1.66	16.62	10.57	10.77	15.00
Ca++	86.78	167.50	90.18	90.18	25.78
Mg++	63.71	66.94	83.41	112.48	113.17
sum cationes	747.54	1251.07	788.25	834.96	644.70
aniones(%)	%	%	%	%	%
HCO3-	0.33	0.22	0.57	0.60	0.34
SO4=	7.86	6.98	6.67	6.36	10.37
Cl-	91.81	92.80	92.75	93.02	89.26
NO3-	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03
Cl-+NO3-	91.81	92.80	92.76	93.04	89.29
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
cations(%)	%	%	%	%	%
Na+ + K+	79.87	81.26	77.98	75.73	78.45
Na+	79.65	79.93	76.64	74.44	76.12
K+	0.22	1.33	1.34	1.29	2.33
Ca++	11.61	13.39	11.44	10.80	4.00
Mg++	8.52	5.35	10.58	13.47	17.55
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Relaciones iónicas					
rNa/rK	357.60	60.15	57.15	57.68	32.72
rMg/rCa	0.73	0.40	0.92	1.25	4.39
rSO4/rCl	0.09	0.08	0.07	0.07	0.12
rCl/rHCO3	278.40	417.45	162.53	155.35	265.03
icb	0.14	0.13	0.15	0.18	0.18
Error (%)	-1.40	-0.21	0.84	0.75	-6.40
$icb=(rCl-(rNa+rK))/rCl$ $kr=(rCa*(rHCO3)^2)^{(1/3)}$ $Error(%)=200*(rCat-rAn)/(rCat+rAn)$					

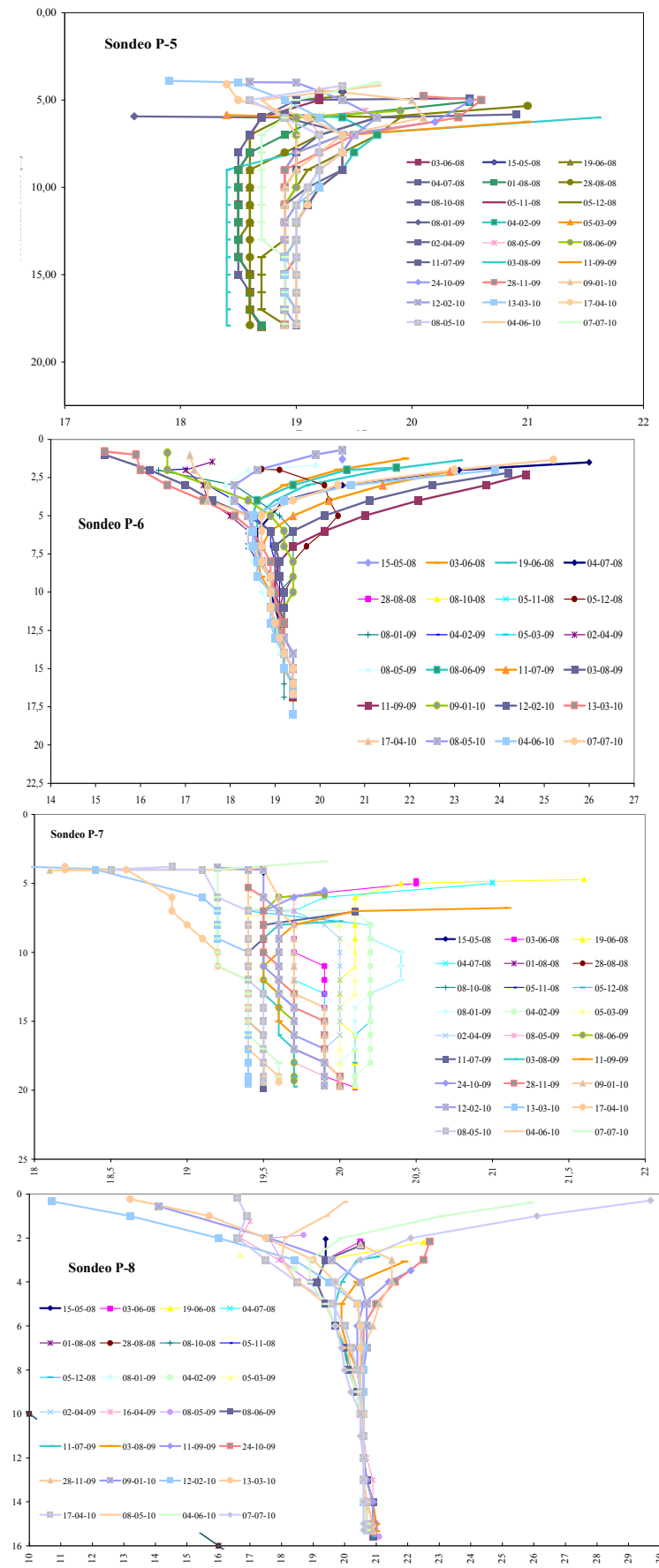
Anexos

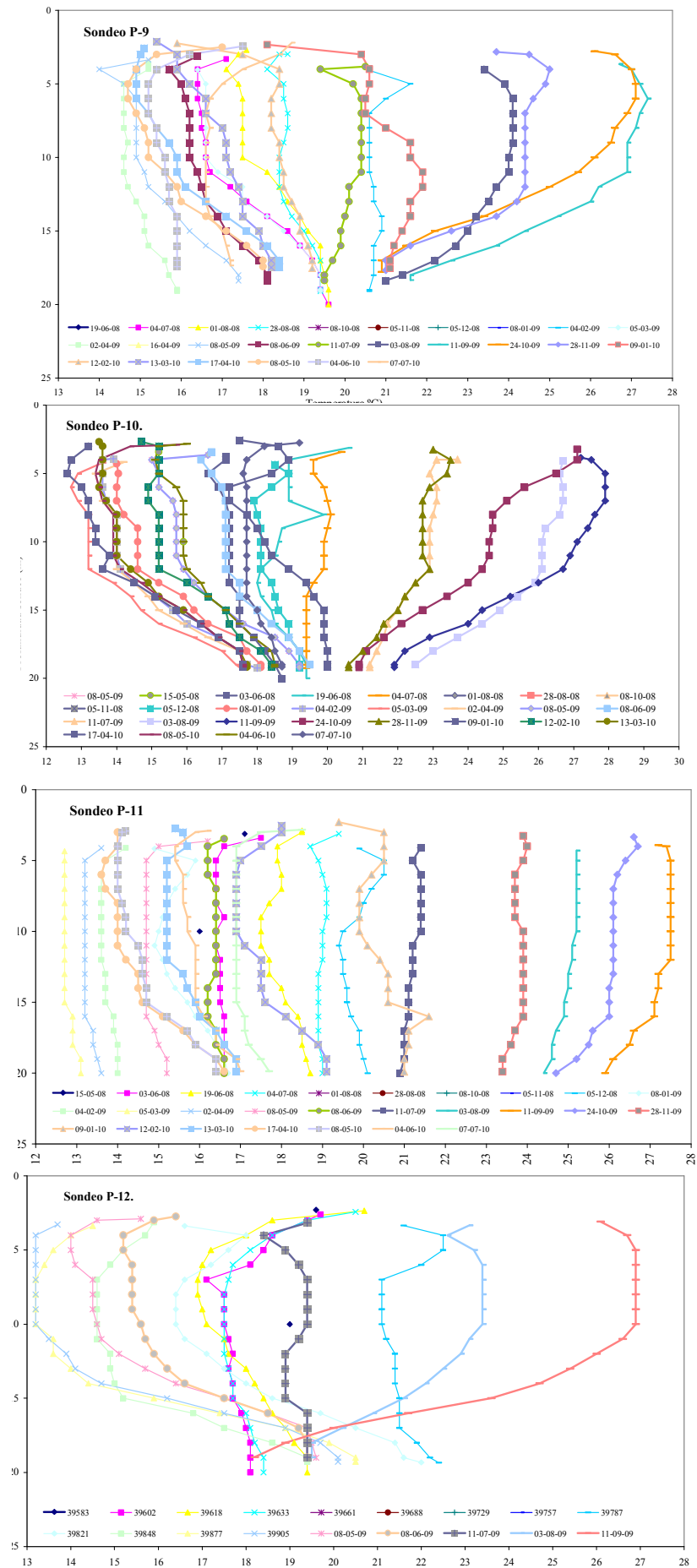
Fecha Muestra	sep-09 16. P-1 09	sep-09 17. P-8 09	dic-10 18. Mar 2	dic-10 19.P-4	dic-10 20.P-19
CE uS/cm	90400.00	67400.00	50200.00	7860.00	13530.00
pH	7.27	7.53	8.20	7.40	7.40
TAC					
DUR	14736.19	13866.99	7080.35	1979.32	2560.33
TSD	84064.51	57682.74	37250.02	6195.80	9884.15
aniones	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
HCO3-	242.68	95.17	162.06	315.72	328.92
SO4=	12074.77	6196.47	2994.31	1614.12	2189.93
Cl-	42016.88	30768.88	20688.61	1922.71	4008.69
NO3-	3.30	9.29	1.88	344.42	56.52
sum aniones	54337.63	37069.81	23846.86	4196.97	6584.06
cationes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Na+	24878.82	16370.00	11117.34	1362.88	2527.57
K+	993.60	604.99	408.46	39.53	31.26
Ca++	642.49	650.50	389.99	237.78	251.98
Mg++	3188.90	2972.97	1482.89	336.47	468.95
sum cationes	29703.81	20598.46	13398.68	1976.66	3279.76
NH4+	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Cl-+NO3-	42020.18	30778.17	20690.49	2267.13	4065.21
Na+ + K+	25872.42	16974.99	11525.8	1402.41	2558.83
aniones (meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
HCO3-	3.98	1.56	2.66	5.18	5.39
SO4=	251.56	129.09	62.38	33.63	45.62
Cl-	1183.57	866.73	582.78	54.16	112.92
NO3-	0.05	0.15	0.03	5.56	0.91
Cl-+NO3-	1183.63	866.88	582.81	59.72	113.83
sum aniones	1439.16	997.53	647.85	98.52	164.85
cationes(meq/l)	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l
Na+ + K+	1107.10	727.21	493.81	60.27	110.69
Na+	1081.69	711.74	483.36	59.26	109.89
K+	25.41	15.47	10.45	1.01	0.80
Ca++	32.12	32.53	19.50	11.89	12.60
Mg++	263.55	245.70	122.55	27.81	38.76
sum cationes	1402.77	1005.44	635.86	99.96	162.05
aniones(%)	%	%	%	%	%
HCO3-	0.28	0.16	0.41	5.25	3.27
SO4=	17.48	12.94	9.63	34.13	27.68
Cl-	82.24	86.89	89.96	54.97	68.50
NO3-	0.00	0.02	0.00	5.64	0.55
Cl-+NO3-	82.24	86.90	89.96	60.61	69.05
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
cations(%)	%	%	%	%	%
Na+ + K+	78.92	72.33	77.66	60.29	68.31
Na+	77.11	70.79	76.02	59.28	67.82
K+	1.81	1.54	1.64	1.01	0.49
Ca++	2.29	3.23	3.07	11.89	7.77
Mg++	18.79	24.44	19.27	27.82	23.92
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Relaciones iónicas					
rNa/rK	42.57	46.00	46.27	58.61	137.46
rMg/rCa	8.20	7.55	6.28	2.34	3.08
rSO4/rCl	0.21	0.15	0.11	0.62	0.40
rCl/rHCO3	297.50	555.54	219.36	10.46	20.94
icb	0.06	0.16	0.15	-0.11	0.02
Error (%)	-2.56	0.79	-1.87	1.45	-1.71
icb=(rCl-(rNa+rK))/rCl kr=(rCa*(rHCO3)^2)^(1/3) Error(%)=200*(rCat-rAn)/(rCat+rAn)					

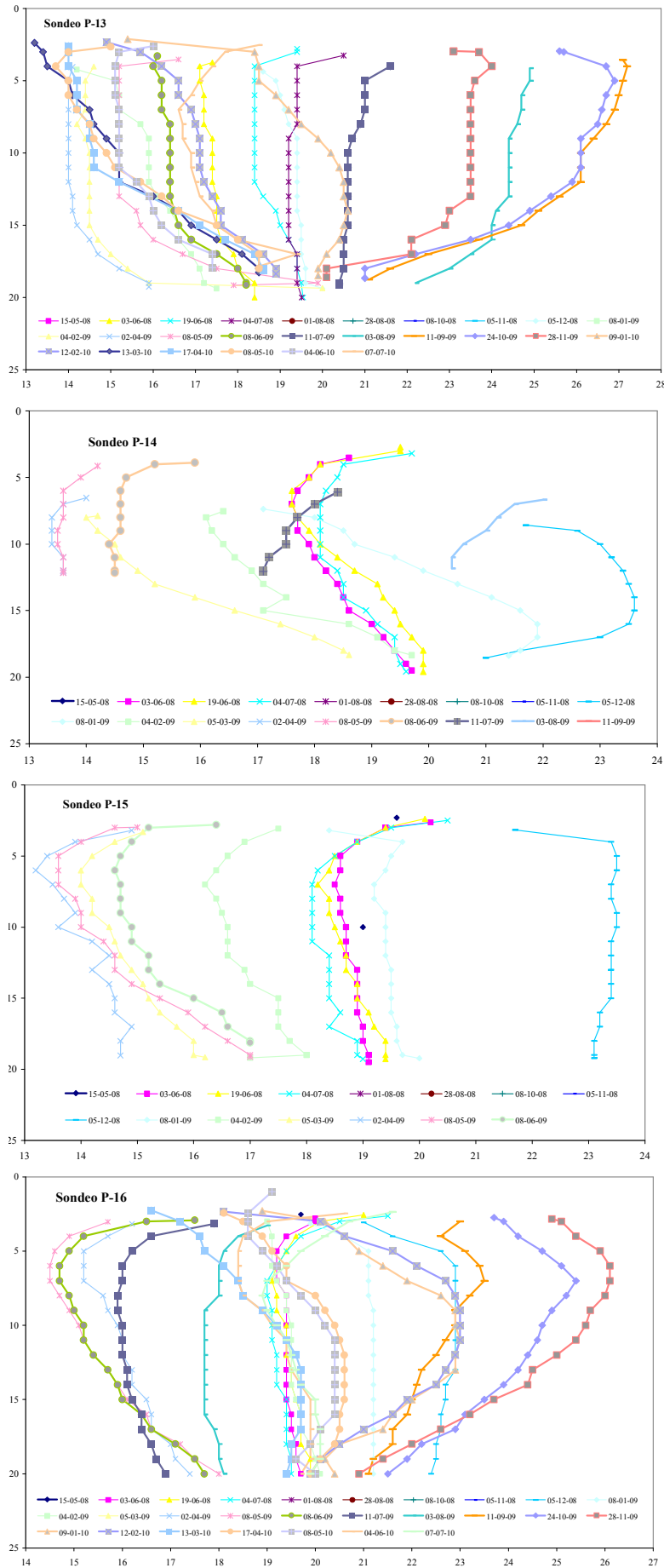
ANEXO 8

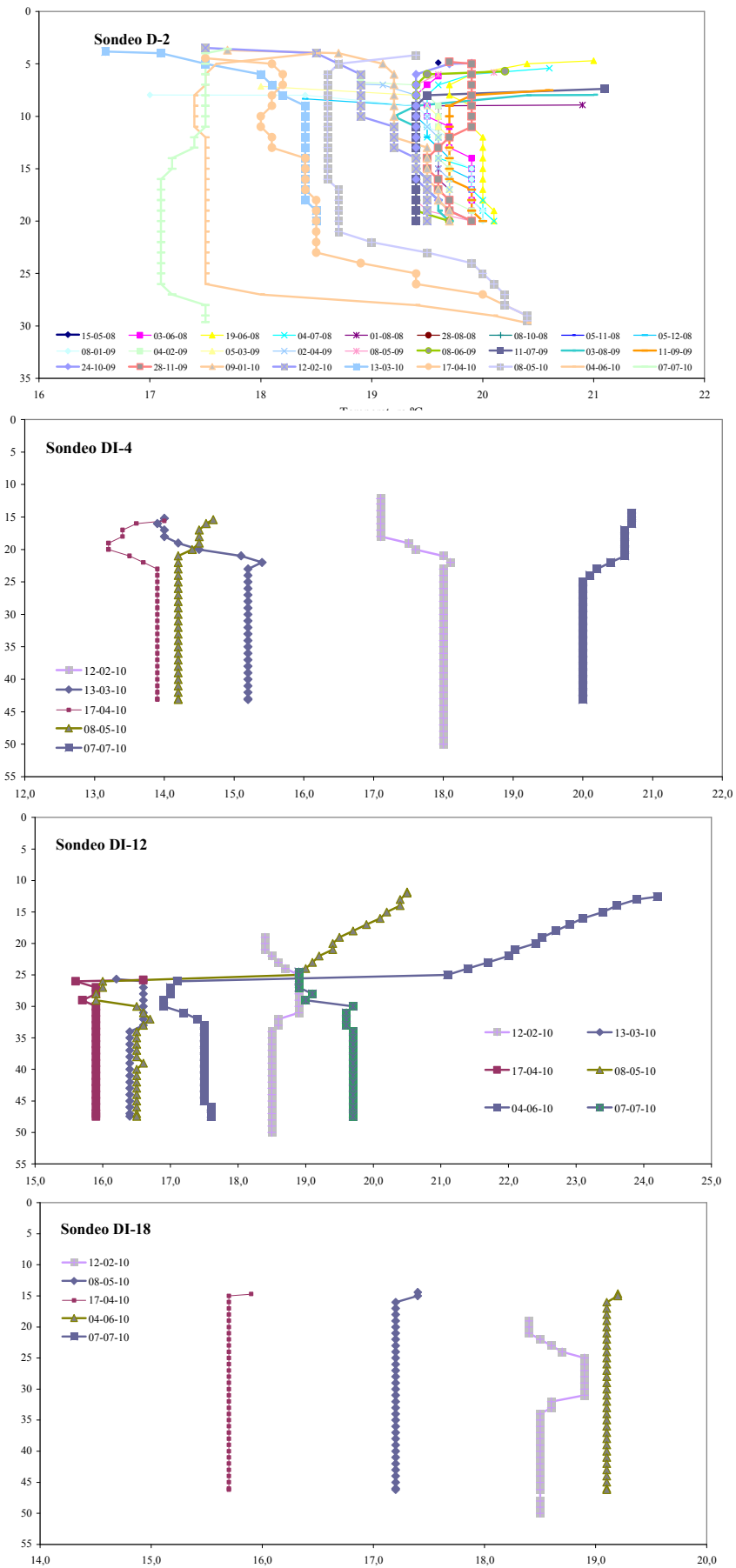
GRÁFICAS DE EVOLUCIÓN TEMPORAL Y EN PROFUNDIDAD DE LA TEMPERATURA











ANEXO 9

CÁLCULO DE LA ETP

		T media mensual del aire	Índice de calor mensual	Índice de calor anual	EVP media en mm/a para meses teóricos de 30 días, con 12 horas diarias de sol (Anexo_)	ETP media en mm/mes con la duración real del mes y el número máximo de horas de luz según la latitud	Número máximo de horas de sol según latitud (Anexo_)		nº de días del mes		
Ciclo hidrológico	mes	t (°C)	i= (t/5)E1.514	I=Σi	$\varepsilon=16(10/I)EXPa$	$ETP=(N/12) \times (d/30) \times \varepsilon \times d$	N	N/12	d	d/30	ETP anual
2007-2008	sep	22.8	9.95	85.59	3.4	106.25	12.5	1.04	30	1.00	952.79
	oct	18.7	7.37		2.4	71.75	11.2	0.93	31	1.03	
	nov	13.2	4.35		1.3	32.83	10.1	0.84	30	1.00	
	dic	12	3.76		1	25.63	9.6	0.80	31	1.03	
	ene	11.5	3.53		0.9	23.78	9.9	0.83	31	1.03	
	feb	12.3	3.91		1.1	27.50	10.7	0.89	29	0.97	
	mar	14.8	5.17		1.6	51.25	12	1.00	31	1.03	
	abr	16.6	6.15		1.9	62.70	13.2	1.10	30	1.00	
	may	18.6	7.31		2.4	91.62	14.3	1.19	31	1.03	
	jun	22.4	9.68		3.4	125.80	14.8	1.23	30	1.00	
2008-2009	jul	25.7	11.92		4.4	170.31	14.5	1.21	31	1.03	
	ago	26.5	12.49		4.5	163.37	13.6	1.13	31	1.03	
	sep	23.7	10.55	85.53	3.8	118.75	12.5	1.04	30	1.00	958.35
	oct	19.3	7.73		2.6	77.73	11.2	0.93	31	1.03	
	nov	12.6	4.05		1.1	27.78	10.1	0.84	30	1.00	
	dic	10.7	3.16		0.8	20.50	9.6	0.80	31	1.03	
	ene	11.2	3.39		0.9	23.78	9.9	0.83	31	1.03	
	feb	11.1	3.34		0.9	20.97	10.7	0.89	28	0.93	
	mar	13.1	4.30		1.2	38.44	12	1.00	31	1.03	
	abr	15.2	5.38		1.6	52.80	13.2	1.10	30	1.00	
2009-2010	may	19.7	7.97		2.7	103.07	14.3	1.19	31	1.03	
	jun	24.3	10.95		3.8	140.60	14.8	1.23	30	1.00	
	jul	26.6	12.56		4.5	174.18	14.5	1.21	31	1.03	
	ago	26	12.13		4.4	159.74	13.6	1.13	31	1.03	
	sep	22.3	9.62	89.53	3.3	103.13	12.5	1.04	30	1.00	971.48
	oct	19.9	8.10		2.6	77.73	11.2	0.93	31	1.03	
	nov	17.2	6.49		1.9	47.98	10.1	0.84	30	1.00	
	dic	13.7	4.60		1.2	30.75	9.6	0.80	31	1.03	
	ene	12.5	4.00		1	26.43	9.9	0.83	31	1.03	
	feb	11.9	3.72		1.2	27.96	10.7	0.89	28	0.93	
	mar	12.8	4.15		1.1	35.24	12	1.00	31	1.03	
	abr	15.8	5.71		1.7	56.10	13.2	1.10	30	1.00	
	may	18.8	7.43		2.4	91.62	14.3	1.19	31	1.03	
	jun	22.8	9.95		3.5	129.50	14.8	1.23	30	1.00	
	jul	26.9	12.78		4.6	178.05	14.5	1.21	31	1.03	
	ago	27.2	12.99		4.6	167.00	13.6	1.13	31	1.03	

Calculo de la EVP media mensual mediante el método de Thornwaite. Valores de N y ε obtenidos de Custodio y Llamas (1983)

ANEXO 10

CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN MENSUAL

Ciclo hidrológico 2007-2008	infiltración mm/mes	Ciclo hidrológico 2008-2009	Infiltración mm/mes	Ciclo hidrológico 2007-2008	Infiltración mm/mes
sep	9.10	sep	11.30	sep	54.30
oct	63.80	oct	2.10	oct	12.80
nov	0.00	nov	4.30	nov	
dic	0.00	dic	0.00	dic	11.60
ene	0.00	ene	0.00	ene	5.30
feb	0.00	feb	0.00	feb	1.30
mar	0.00	mar	24.70	mar	6.70
abr	0.00	abr	0.00	abr	
may	6.50	may	0.00	may	5.50
jun	4.10	jun	0.00	jun	
jul	0.00	jul	0.00	jul	
ago	0.00	ago	0.00	ago	0.80
Infiltración anual	83.50	Infiltración anual	42.40	Infiltración anual	98.30

Calculado con un valor de Capacidad de campo=15% y un espesor de suelo=0,15 m

Ciclo hidrológico 2007-2008	infiltración mm/mes	Ciclo hidrológico 2008-2009	Infiltración mm/mes	Ciclo hidrológico 2007-2008	Infiltración mm/mes
sep	0.00	sep	6.30	sep	35.50
oct	42.20	oct		oct	7.80
nov		nov		nov	
dic		dic		dic	14.10
ene		ene		ene	9.80
feb		feb		feb	
mar		mar	19.70	mar	6.20
abr		abr		abr	
may	1.80	may		may	
jun		jun		jun	
jul		jul		jul	
ago		ago		ago	
Infiltración anual	44.00	Infiltración anual	26.00	Infiltración anual	73.40

Calculo para un valor de Capacidad de campo=20% y un espesor de suelo=0,20 m